

Hegedűs Ernő¹ – Ficsor Botond²

NÁTRIUMHŰTÉSŰ INCONEL KIPUFOGÓSZELEP ADDITÍV GYÁRTÁSA ADAM FÉMNYOMTATÁSI TECHNOLÓGIÁVAL

THE ADDITIVE MANUFACTURING OF A SODIUM-
COOLED INCONEL EXHAUST VALVE USING ADAM
METAL PRINTING TECHNOLOGY

[HTTPS://DOI.ORG/10.30583/2024-3-4-154](https://doi.org/10.30583/2024-3-4-154)

Összefoglalás

Az Inconel egy kereskedelmi név; a magas hőmérsékletű ötvözetek széles skáláját öleli fel, amelyek fő összetevői a nikkel és a króm. A cikk magas hőszilárdságú, üreges, nátriumhűtésű Inconel kipufogószelep additív gyártásának lehetőségeit vizsgálja ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing – Atomi Diffúziós Additív Gyártástechnológia) fémnyomtatási technológiával. A turbófeltöltött gépjármű dízelmotorok fejlesztésének új polgári és katonai irányzatai igénylik a hőálló Inconel kipufogószelep alkalmazását.

Kulcsszavak: additív gyártástechnológia, ADAM fémnyomtatás, Inconel, belsőégésű motor, nátriumhűtésű szelep, katonai alkalmazású dízelmotorok

Abstract

Inconel is a trade name covering a wide range of high-temperature alloys, the main constituents of which are nickel and chromium. This article explores the possibilities of additive manufacturing of a high-temperature,

¹ Dr. Hegedűs Ernő alezredes, PhD, NKE Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Haditechnikai Tanszék, adjunktus.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8457-5044>

² Ficsor Botond hadnagy, NKE Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Katonai logisztika alapképzési szak, Haditechnikai specializáció BSc, MH Klapka György 1. Páncélosdandár, Logisztikai zászlóalj, 2. Műveleti logisztikai század, harc- és gépjárműjavító szakasz, szakaszpáncsnok.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3698-0426>

hollow, sodium-cooled Inconel exhaust valve using ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing) metal printing technology. New civil and military trends in the development of turbocharged automotive diesel engines require the use of the heat-resistant Inconel exhaust valve.

Keywords: additive manufacturing, ADAM metal printing, Inconel, internal combustion engine, sodium-cooled valve, military diesel engines

Bevezetés

A belsőégésű motorok alkatrészeinek gyártástechnológiáját, illetve a motorok szerkezetét jelentős mértékben alakítja át az additív gyártástechnológia – elsősorban a fém 3D nyomtatás – megjelenése. Ennek a korszerűsödési folyamatnak az egyik részterülete a belsőégésű motorok nátriumtöltésű szelepeinek gyártása. Korábbi szakirodalmi példák leírják a magas hőszilárdságú, üreges, nátriumhűtésű Inconel kipufogószelep SLS technológiával (szelektív lézeres szinterezés) történő additív gyártásával kapcsolatos tapasztalatokat, azonban az ADAM fémnyomtatási technológia lehetőségeinek vizsgálatára e területen még nem került sor. A 3D nyomtatás napjainkban terjed el a haditechnikai eszközök tervezésében, üzemeltetésében.³ Az ADAM fémnyomtatási technológia megnevezése arra a fontos jellemzőre utal, hogy a nyomtatás rétegenként történik fémtartalmú filament⁴ felhasználásával. Mosást követően a rétegek – egy elektromos fűtésű, argonvédőgázos hőkezelő kemencében végzett, mintegy 1300 °C-os szinterezés során – összeolvadnak és homogén terméket alkotnak, amely

³ Gyarmati József: Lánctalpas jármű kormányzása és ennek 3D modellezése Műszaki Katonai Közlöny 33. évf. 2023. évi 3. szám pp. 51-61. doi:10.32562/mkk.2023.3.5 illetve Végvári Zsolt: A 3D nyomtatás felhasználási lehetőségei a műveleti logisztikában Katonai logisztika 2023. évi 1-2. szám. 177-198. DOI:10.30583/2023-1-2-177 továbbá Dr. Zentay Péter – Dr. Hegedűs Ernő – Végvári Zsolt: A 3D nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei I-III. rész. Haditechnika 57. évf. 2022 -2023. évi 6.,1.; 2. sz. és Gávay György: Honvédségi járművek kezelőszerveinek pótlása, módosítása 3D nyomtatási technológia alkalmazásával Műszaki Katonai Közlöny 2024. évi 2. szám. és Kovács, Zoltán Tibor; Ember, István; Daruka, Norbert; Vég, Róbert; Dénes, Kálmán: Harctéri 3D- nyomtatók alkalmazási lehetőségei és alapvető technikai követelményei HADTUDOMÁNYI SZEMLE 17: 2 pp. 5-15. p. (2024).

⁴ A filament 3D nyomtatáshoz használt, műanyag vagy részben fémalapú alapanyag, kör keresztmetszetű műanyag szál, ami az FDM-hez (Fused Deposition Modeling – olvasztott lerakásos modellezés) és az FFF-hez (Fused Filament Fabrication – olvasztott szálak gyártás), illetve az ADAM típusú 3D nyomtatáshoz szükséges. A filament leggyakrabban tekercsekben kerül forgalmazásra, 1,75 mm vagy 3,0 mm vastagságban.

minden irányban azonos szilárdsági jellemzőket biztosít, ellentétben például a korábban említett SLS eljárással. Az ADAM technológiához felhasználható anyagok: szerszámacélok, rozsdamentes acél, alacsony olvadáspontú réz és hőálló, magas olvadáspontú Inconel. A 3D fémnyomtatás ADAM technológiával történő alkalmazása különösen alkalmas hőálló, nehezen önthető és nehezen megmunkálható ötvözetek előállítására. Ezek az ötvözetek, például az Inconel körülbelül 700 °C-ig hőállóak. Az ADAM fémnyomtatási technológia fokozottan alkalmas továbbá zárt belső üregek előállítására is, így szerepe a jövőben a nátriumtöltésű kipufogószelepek gyártása területén is jelentős lehet. A jelen tanulmányban ismertetett ADAM fémnyomtatási technológia gyors alapanyagcserét tesz lehetővé, és több egészségvédelmi előnnyel is bír: például nincs szálló vagy bőrhöz tapadó fémpor az eljárás alkalmazása során.⁵

Jelen tanulmány a magas hőszilárdságú, üreges, nátriumhűtésű Inconel kipufogószelep additív gyártásának lehetőségeit vizsgálja ADAM fémnyomtatás technológiával. Ennek aktualitása, hogy az ezredforduló utáni motorfejlesztési irányok több esetben is megkövetelik magas hőszilárdságú, ugyanakkor jó hővezetési képességgel rendelkező, komplex belső geometriájú, üreges Inconel szelepek alkalmazását. A magas hőszilárdságú nikkel-ötvözet használatának lehetőségét elsősorban a turbófeltöltött gépjármű dízelmotorok esetében célszerű kutatni.⁶ E motorok fejlesztésének egyik iránya a turbófeltöltőre eső hőenergia növelése pl. a feltöltő optimalizált, kompakt elrendezésével, amellyel kapcsolatos fejlesztési koncepciót (Hot V, Hot Side Inside vagy Heisse Seite Innen – HSI - turbómotor-építési mód) ez a tanulmány is ismerteti. A HSI motoron alkalmazott turbófeltöltő magasabb hőkihasználtsága a kipufogószeleptől a turbófeltöltő turbináig terjedő szakasz magasabb üzemi hőmérsékletén alapul. Ezért ez a fejlesztési irányzat (HSI) igényli a hőálló Inconel kipufogószelep alkalmazását, akárcsak a jelen tanulmányban szintén érintett katonai alkalmazású keramizált-adiabatikus vagy részben keramizált LHR (Low Heat Rejection – csökkentett hőátbocsátás) dízelmotor-konstrukciók.⁷

⁵ Rákosi Sára - Sebők István - Szalai Tamás - Dr. Vég Róbert László: A 3D nyomtatás biztonságtechnikai és környezetvédelmi aspektusai Katonai Műszaki Közlemény 33. évf. 1. sz. pp. 133–148. doi: 10.32562/mkk.2023.1.10

⁶ Vég Róbert László: Belsőégésű motorok I-II.-III. kötet. Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Bolyai János Katonai Műszaki Főiskolai Kar, Budapest, 2001-2003.

⁷ Dr. Vég R. – Dr. Hegedűs E.: Dízelmotorok feltöltése és hűtése, különös tekintettel a katonai felhasználásra tervezett konstrukciókra I-II. rész. Haditechnika 2016/6; 2017/1. sz.

Egyes esetekben – például léghűtéses motoroknál – korábban is alkalmaztak a kipufogószelep anyagként Inconelt. Napjainkban léghűtéses motorkerékpárok motorjaiban (pl. Yamaha XJR 400), illetve felső-kategóriás gépkocsik motorjain (pl. Mercedes V-12 Maybach S680 háromszelepes motor), továbbá léghűtéses repülőgépmotoroknál (Rotax 914, 924 boxermotorok) egyaránt használnak olyan nátriumtöltésű üreges kipufogószelepet, melynek anyaga magas hőszilárdságú Inconel. Az Audi SQ8 V8TD motor esetében a kipufogó gyújtócső készül Inconelből. Számos további példa található még az Inconel alkalmazására belsőégésű hőerőgépek (dugattyús motor, gázturbina) nagy hőki-tettséggű helyein.

Turbófeltöltéses Otto-motorok esetében a nátriumtöltésű szelep lehetővé teszi a szelep üzemi hőmérsékletének jelentős csökkentését, ezzel a kompresszióviszony és a hatásfok növelését is. A léghűtéses (pl. motorkerékpár, repülőgép, UAV stb.) motoroknál jelentkező magasabb üzemi hőmérséklet a szelepek közötti gát repedését okozhatja a hengerfejen. E meghibásodás elkerülése érdekében szintén kedvező megoldás a kedvező hőelvezetést biztosító nátriumhűtésű üreges szelep alkalmazása.

Jelen tanulmány részben a Nemzeti Közzolgálati Egyetem NKE Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Haditechnikai Tanszék pályázati kutatásainak eredményeképpen jött létre.⁸ Az Inconel 625 kipufogószelep nyomtatására e tanszék Markforged MetalX fémnyomtatóján került sor. Ficsor Botond – az NKE HHK Haditechnikai Tanszék hallgatójaként – e téma kutatásával foglalkozott a Nemzeti Közzolgálati Egyetem 2023-as tavaszi Intézményi Tudományos Diákköri Konferenciáján, illetve szakdolgozatában, továbbá cikkeiben.⁹ Az ADAM tech-

⁸ A 2022-2.1.1-NL-2022-00012 azonosító számú Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratóriuma projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2022-2.1.1-NL Nemzeti Laboratóriumok Létrehozása, Komplex Fejlesztése pályázati program finanszírozásában valósul meg.

⁹ Ficsor Botond: Fém 3D nyomtatás alkalmazásának lehetséges előnyei belsőégésű hőerőgépek fejlesztése és gyártása során, polgári és katonai aspektusból Nemzeti Közzolgálati Egyetem, 2023 tavaszi Intézményi Tudományos Diákköri Konferencia, illetve Ficsor, Botond (2024) A 3D-s fémnyomtatás, mint a gépjárműmotorok gyártásának ígéretes jövőbeni technológiája. Haditechnika, 58 (1). pp. 50-54. továbbá Ficsor, Botond és Hegedűs, Ernő: A 3D fémnyomtatás alkalmazhatóságának vizsgálata MALE-kategóriájú UAV-dízelmotor fejlesztésre: 3D nyomtatással gazdaságosan gyártható könnyített szerkezetű alkatrészek és részegységek a repülő szakterületen. KATONAI LOGISZTIKA, 2023. évi 31. évf. 1-2. sz. pp. 38-72. ISSN 1588-4228

nológiájú additív gyártástechnológia – fémnyomtatás – megismerésének céljából Ficsor Botond dr. Hegedűs Ernő témavezetésével 3D nyomtatási kísérleteket hajtott végre, ami egy üreges Rába D0836 turbódízelmotor kipufogószelepének előállítására irányult.

1. Turbófeltöltés hőfelhasználásának optimalizálása HSI feltöltőelrendezéssel

Turbófeltöltött dízelmotorok fejlesztése esetében az Audi motorépítési koncepciója mutat utat, melynél a kipufogóoldal és a turbófeltöltők a V-motor középső, hengersorok közötti ágyában foglalnak helyet, ezzel a kipufogógáz gázhőmérséklete a turbófeltöltő belépő keresztmetszeténél elérheti akár a 860 °C értéket is.¹⁰



1. számú ábra. Az Audi 4.0 V8 TFSI HSI motorján jól látható, ahogy a turbófeltöltő a V-motor hengersorai között foglal helyet¹¹

¹⁰ The Audi 4.0l V8 TFSI engine from the EA825 series eSelf Study Program 920493. <https://static.nhtsa.gov/odi/tsbs/2020/MC-10172005-0001.pdf> illetve Dr. Nagyszokolyai Iván: Audi V8-TDI. <http://www.lezo.hu/szerkezettan/hajtas/motor/dizel/PDF/Dizelek-fejlesztese.pdf> (2024.02.27.)

¹¹ https://www.speednik.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2021/01/inside-bentleys-new-4-0l-twin-turbo-flying-spur-v8-engine-2021-01-18_16-55-15_712516.jpg

Az AUDI motorpalettájában ilyen HSI motortípusok az Audi 3.0L V6 TFSI turbódízelmotor vagy az Audi 4.0 V8 TFSI biturbó dízelmotor.¹² A Ferrari 126C F1 versenygépkocsi már 1981-ben HSI („Hot Vee¹³”) turbófeltöltő elrendezést alkalmazott. Az első olyan sorozatgyártású motor, amely HSI turbófeltöltő elrendezést használt, a 2008-as BMW N63 volt az USA-ban gyártott BMW X6-ba építve. A HSI rendszerű Mercedes–AMG GT motorját 2014-ben, a Porsche Cayenne Turbo motorját 2018-ban mutatták be, míg a Cadillac ikerturbós 4,2 literes V8-asa a CT6-V gépkocsiban 2019-ben jelent meg. Katonai rendeltetésű motorok közül „Hot Vee” turbófeltöltő elrendezést alkalmaz az orosz T-14 Armata harckocsi Chelyabinsk 12H360 2V-12-3A típusú X-elrendezésű biturbó dízelmotorja is.¹⁴



2. számú ábra. A Mercedes–AMG GT V-8 biturbó HSI motorja a hengerek közötti turbófeltöltővel¹⁵

¹² Dr. Nagyszokolyai Iván: Tanuljunk újdízelül! <https://autotechnika.hu/cikkek/motor-eroatvitel/11488/tanuljunk-ujdizeluel>

¹³ Hot Vee vagy Hot V, mindkettő elfogadott elnevezés

¹⁴ Zentay Péter - Gyarmati József: „Vitézek” a Vörös téren II. rész - Harckocsik és harckocsi támogatók. HADITECHNIKA, LIII. évf., 2019. évi 4. szám, DOI: 10.23713/HT.53.4.05.

¹⁵ Lewis Kingston: What is a 'hot V' configuration? <https://www.pistonheads.com/news/general-pistonheads/what-is-a-hot-v-configuration-ph-explains/38096> (2018.05.27.)

A HSI dízelmotor-konstrukció minden korábbi elrendezésnél jobb lehetőséget biztosít a kipufogógázok veszteség hőinek hasznosítására, azonban a magas üzemi hőmérséklet nikkelötvözetű szerkezeti anyagok alkalmazását követeli meg a kipufogórendszerben.¹⁶ A jelentős hőterhelés miatt a jövőbeni HSI motorfejlesztés tekintetében is felmerül az Inconel anyagú, üreges, nátriumtöltésű szelepek alkalmazásának lehetősége.

Ugyancsak magas hőterhelés mutatkozik – elsősorban a kipufogószelepnél és a turbófeltöltőnél – azoknál a részben keramizált, „kvázi-adiabatikus”, illetve LHR csökkentett hűtési igényű motorkonstrukcióknál is, melyeket az US Army – a magasabb harci túlélőképesség megvalósítása reményében – az ezredfordulót követően kimondottan katonai járművek számára fejlesztett ki és alkalmaz. Ilyen keramizált motort használnak az M-109 típusú önjáró löveg motorjaként vagy egyes kísérleti „adiabatikus”, hűtő nélküli, keramizált gép- és harcjárműmotorokként (az A6 és A7 típusváltozatoknál).¹⁷

2. A nátriumhűtésű szelepek alkalmazási jellemzői

Nátriumhűtés esetében „a szeleptányér hőmérséklete 80-100 °C-kal csökkenthető” a hagyományos szelepekhez képest.¹⁸ A nátriumtöltésű szelepek először a repülőgépmotoroknál jelentek meg a harmincas években,¹⁹ mivel az itt alkalmazott léghűtéses csillag-, illetve boxer hengerelrendezésű – rendszerint feltöltéses – motorok hőterhelése igen jelentős volt.

Az üreges kialakítású nátriumtöltésű szelepek ilyen magas hőmérsékletű környezetben elősegítették a keletkező hő hatékony elvezetését a szeleptányérról a szelepszár irányába, lehetővé téve ezzel a szelep hőmérsékletének hatékony csökkentését. A kipufogószelep – mint

¹⁶ Evan Williams: What is a Hot V Engine and How Does It Work? <https://www.autoguide.com/auto-news/2018/12/what-is-a-hot-v-engine-and-how-does-it-work-.html>

¹⁷ Dr. Vég R. – Dr. Hegedűs E.: Dízelmotorok feltöltése és hűtése, különös tekintettel a katonai felhasználásra tervezett konstrukciókra I-II. rész. Haditechnika 2016/6; 2017/1. sz.

¹⁸ Dezsényi Gy. – Emőd I. – Finichiu L.: Belsőégésű motorok tervezése és vizsgálata. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1999. 683. o.

¹⁹ Colwell: The development of sodium-cooling of exhaust valves. Automotive Industries, vol. 82, no. 9 (May 1, 1940), pp. 417-418.

az égéstér legmelegebb pontja – hőmérsékletével befolyásolja a benzinüzemű motorok maximálisan megvalósítható kompresszióviszonyát, mivel annak magas hőmérséklete miatt már alacsonyabb kompresszióviszony esetén is beindíthatja a keverék öngyulladását. A kipufogószelep nátriumos hűtésével a szelep hőmérséklete csökkenthető, ezáltal a kompresszióviszony kismértékben növelhető. A kompresszióviszony növelése viszont növeli az Otto-körfolyamat hatásfokát és teljesítményét is.

Az utóbbi évtizedekben a turbófeltöltés elterjedésével a belsőégésű motorok fajlagos teljesítménye növekedett, ezzel számos alkatrész hőterhelése is nőtt. Turbófeltöltés alkalmazása esetén a szerkezeti elemek hőterhelésének növekedése a kipufogószelepekre fokozottan érvényes, ami megkívánja a nátriumhűtésű, üreges kialakítású kipufogószelepek alkalmazását. A turbófeltöltött léghűtéses repülőgépmotorok hűtésének fejlődésére jó példa a kovácsolt és megmunkált alumínium hengerfejjel, valamint kovácsoltacél-hengerrel szerelt 1948-as Wright Turbo-Cyclone motor. A hengerelt alumínium hűtőbordákkal és *nátriumhűtéses kipufogószelepekkel* felszerelt léghűtéses motornál több, mint 100 cm²-nyi hűtőfelület jut minden egyes négyzetcentiméternyi dugattyúfelületre.²⁰

A turbófeltöltés elterjedése következtében folyamatosan növekszik a dízelmotorok fajlagos teljesítménye is. A turbódízelmotorok teljesítménynövelésének felső korlátját – a teljesítmény (középnymás) növekedéséből fakadó, csapágyakra, hengerfejsavarokra és hajtórúdra ható, jelenleg rendelkezésre álló eszközökkel könnyen leküzdhető mechanikai terhelés mellett – *főként „a dugattyú, a dugattyúgyűrűk és a szelepek hőterhelése adja.”*²¹ A szelepek hőterhelését bevonatoló keramizálással és nátriumos belső hűtéssel, továbbá kisebb ellenállású négyszelepes hengerfejek alkalmazásával hatékonyan lehet csökkenteni.

A nátriumhűtésű, üreges kialakítású szelepek alkalmazásának tehát számos motorteknikai előnye van. Az ilyen szerkezetű szelepek széleskörű elterjedésének korlátja azonban a magas beszerzési ár, ami a bonyolultabb gyártástechnológiához köthető.

²⁰ Aircraft propulsion. Smithsonian Air and Space Museum, Books Express Publishing, 2011. https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/18674/SAoF-0001.4-Lo_res.pdf?sequence=3&isAllowed=y 43. o.

²¹ Kalmár István – Stukovszky Zsolt: Belsőégésű motorok folyamatai. Műegyetemi Kiadó, Budapest. 1998. 341. o.

3. Inconel ötvözet – mint magas hőszilárdságú ötvözet – alkalmazásának lehetősége belsőégésű hőerőgépek szerkezeti elemeinél

A magas hőállóságú szelepek szerkezeti anyagai között gyakran alkalmaznak Inconel alapanyagot. Az International Nickel Co. által gyártott Inconel fémötvözetből létezik 601, 625, 628 és 718, illetve 728 jelű is. Az Inconel IN625 „szakítószilárdsága 920 MPa, folyáshatára 670 MPa, szakadási nyúlása 40% körüli értékre adódik, hőállóságának határa elérheti akár az 1000 °C -os értéket is, az IN718 szakító szilárdsága 1020 MPa, folyáshatára 710 MPa, szakadási nyúlása 29%”.²² A brit Parlament Tudományos és Technológiai Bizottságának "Stratégiailag fontos fémek" tárgykörben írott jelentése jól összefoglalja az Inconel jellemzőit és alkalmazási területeit: „A motorfejlesztés terén vezető anyagfejlesztésben a modern gázturbinák kiváló példák. Sir Frank Whittle gázturbina-fejlesztése óta ezek a hőerőgépek csak olyan anyagok párhuzamos fejlesztésével tudtak fejlődni, amelyek képesek folyamatosan emelkedő hőmérsékleten és nagyobb igénybevétel mellett is működni. Az ilyen magas hőmérsékleten működő anyagok nemcsak acélok; még a nagyon erősen ötvözött rozsdamentes acélokhoz képest is nagyon kevés vasat tartalmaznak. A belső égésű motorok fejlesztése során az ilyen anyagokat számos alkalmazási területen hasznosították. Az Inconel ötvözetek fő összetevői a nikkel és a króm. Drágák, mert nagy arányban tartalmaznak „stratégiai elemeket”, azokat, amelyekről úgy ítélik meg, hogy hiánycikknek számítanak, és amelyek nagy gazdasági és politikai jelentőséggel bírnak. Az Egyesült Királyság kormánya számos olyan elemet azonosított, amelyek stratégiailag fontosak, és a listán a nikkel és a króm is szerepel. Mindkét elem „korlátozott hozzáférhetőségű” és potenciális „ellátási kockázatot” jelent, amiért felkerültek erre a listára. Az Inconel versenymotorokkal kapcsolatban leggyakrabban tárgyalt felhasználása a *kipufogórendszerek gyártásában való elterjedt és egyre növekvő felhasználása*. Ahogy a csapatok felismerik, hogy az Inconel kipufogórendszerek lehetnek *könnyűek* és strapabírók is, egyre népszerűbbek, mivel a legmagasabb költségvetésű kis sorozatból, ahol a *minimális tömeg a cél*, az anyag „lefelé elmozdul” az alacsonyabb költségvetésű sorozatgyártások felé, ahol már fontos a tartósság is. A kipufogórendszerek gyártásához leggyakrabban használt Inconel ötvözet az IN625-ös ötvözet. Az Inconel anyagoknak

²² Dr. Zsidai László – Dr. Sarankó Ádám – Szabó Péter: Az additív technológiák terméktervezési és technológiai sajátosságai Magyar Mérnöki Kamara Kiadványsorozata. 111. Gépészeti Tagozat. Gödöllő, 2023. október. Inconel: 36. o.

azonban számos más alkalmazása is létezik. Meglehetősen széles körben használják nagy igénybevételnek kitett kötőelemekhez, és hajtórúdcsavarként is, különösen az IN718-as ötvözetet. Bár ez az alkalmazás nem használja ki az Inconel magas hőmérsékletű képességeit, a szakító és kifaradási tulajdonságai szobahőmérsékleten is igen kedvezőek; az anyag sokkal jobban ellenáll a korróziónak, mint az azonos erősségű acélanyagok (230 ksi/1600 MPa). A motorokban az Inconel-ötvözet felhasználása teljes mértékben kihasználja az anyag magas hőmérsékletű kifaradási szilárdságát.²³



3. számú ábra. Kompresszoros és turbófeltöltéses versenymotorokban használt Inconel kipufogószelepek²⁴

Az Inconel 751-et elsősorban magas működési hőmérsékletű szelepekhez használják; ez az ötvözet különösen népszerű kompresszoros vagy turbófeltöltős motoroknál, ahol a kipufogószelepek hőmérséklete

²³ Inconel. "Strategically important metals." House of Commons Science and Technology Committee Report. <http://www.publications.parliament.uk/pa/cm201012/cmselect/cmsctech/726/726.pdf> (2012.12.02.)

²⁴ Inconel. "Strategically important metals." House of Commons Science and Technology Committee Report. <http://www.publications.parliament.uk/pa/cm201012/cmselect/cmsctech/726/726.pdf> (2012.12.02.)

sokkal magasabb, mint a szívómotorok esetében. Szívó versenymotorokban gyakori az ausztenites acél, például a 21-4, valamint a titán használata. A jelentősen megnövekedett tömegáramú és hőmérsékletű motor futása által támasztott zordabb körülmények között azonban ezek az anyagok nem működnek túl sokáig. Míg az olyan ötvözetek, mint az Inconel 751, sűrűbbek, mint akár az ausztenites acélok, akár a titán, használatuk szelepek gyártásához egyre inkább szükséges.²⁵

Hazai szakirodalomban 1940-ben jegyezték fel elsőként, hogy: „Hangtompítók és kipufogó-szerkezetekhez használatos az Inconel ötvözet 80% Ni, 13% Cr és 7% Fe összetétellel, amely ötvözet megmunkálás útján keményíthető.”²⁶ Itt említjük meg a gázturbináknál általánosan használt és az autóépítésben is terjedő nagy hőállóságú, hőszilárdságú szerkezeti anyagokat, nevezetesen a Nimonic és *Inconel* ötvözeteket. A titán tartalmú nikkelötvözetek rövid ideig 800 °C hőmérsékleten is alkalmazhatók, míg a kobalt ötvözetek 950 °C hőmérséklet-tartományban is hosszabb ideig vehetők igénybe.”²⁷ Mi a hőálló „szuperfém”, és mi köze ennek az Inconelhez illetve a kipufogószelepekhez? Egy 1987-es szakirodalom így írt a szuperfémek fejlesztéséről: „A ma szuperötvözeteknek nevezett anyagok fejlődését a magas hőmérsékletű ötvözetek fejlődésének kezdeteitől tekintjük át, a mérnökök azon igényeinek fényében, hogy az anyagok különböző igénybevételi, hőmérsékleti és környezeti körülmények között is használhatóak legyenek. A repülőgépek gázturbinájának bevezetése előtt ... A dugattyús repülőgép-motorok két problémás területet vetettek fel – ez a kipufogószelep és a turbófeltöltő turbinája volt –, és ezen alkatrészekhez speciális anyagokat vezettek be, nagyrészt a magas hőmérsékletű szakítószilárdság alapján. A gázturbina turbinalapátja nagy hőállóságot követelt meg, és az ötvözetfejlesztés két fő irányvonalát követték: a karbidkeményített vas- vagy kobaltbázisú ötvözeteket és a γ' -keményítésű *nikkelbázisú ötvözeteket*. Az utóbbi típus felülmúlta az előbbi, és ma már vagy kovácsolt formában, vagy – főként a legnehezebb körülmények között – öntvényként a szuperötvözet-alkalmazások fő támasza. Az utóbbi években a fejlődést elsősorban a makroszerkezet javításával próbálták elérni: az öntvényeknél irányított szilárdítással, hogy oszlopos kristályok vagy *egy kristályok* jöjjenek létre, a kovácsolt

²⁵ Inconel. "Strategically important metals." House of Commons Science and Technology Committee Report. <http://www.publications.parliament.uk/pa/cm201012/cmselect/cmsctech/726/726.pdf> (2012.12.02.)

²⁶ „35—50 ton./hűv².-ről 85 ton./hűv.²-re Anyagvizsgálók Közlönye, 1940. 18. évfolyam, 4. szám. 171. o.

²⁷ Dr. Nádasi Antal – Nagyszokolyai Iván: Nagysebességű laboratóriumok. Technika, 1973. 17. évfolyam, 7. szám, 7. o.

termékeknel pedig portechnológiát alkalmaznak. A jelentősebb magas hőmérsékletű korrózió ellen a felületi védőbevonatok alkalmazásával és egy sor kovácsolt és öntött, *magas krómtartalmú nikkel-bázisú ötvözet* kifejlesztésével küzdöttek. A magas hőmérsékletű anyagtechnológiában várhatóan a jövőbeni előrelépés a különböző metallurgiai és fizikai technikáknak az egyes műszaki alkatrészekre történő alkalmazásában lesz keresendő, hasonlóan az 50 évvel ezelőtti repülőgépmotorok kipufogó szelepeihez.”²⁸

4. Inconel szelep nyomtatásának lehetőségei szelektív lézeres szinterezés (SLS) fémnyomtatási technológiával

Egy 2015-ös szakirodalomban leírják a magas hőszilárdságú, üreges, nátriumhűtésű Inconel kipufogószelep SLS technológiával történő additív gyártásával kapcsolatos tapasztalatokat.²⁹ Egy nagy teljesítményű, léghűtéses motorkerékpár motor (KTM 525 EXC 2006 típus) kipufogószelepét újratervezték, és az additív gyártástechnológia adta lehetőségek mentén optimalizálták. A nyomtatás során 4 kW összteljesítményű lézerrel működő EOS M270 nyomtatót és Inconel 718 fémötvözetet alkalmaztak, mivel ez az ötvözet még 600-700 °C-os hőmérsékleten is megőrzi szilárdságának mintegy 80-90%-át. A tervezésben és a validálásban a mikroszámítógépes tomográfiát alkalmazták.

Mikroszámítógépes tomográfia (μ -CT) szkennelést alkalmaztak az eredeti szelep visszatervezéséhez, valamint a 3D nyomtatott szelep belső geometriájának és anyagintegritásának felmérésére is. A szelepet a végeelem-elemzés (FEA) segítségével újratervezték. Az újszerű, komplex geometriájú üreges szelepfej létrehozásának lehetősége a belső folyékony nátrium-hűtőfolyadék használatakor előnyt jelentett. A szelep ezáltal nagyobb hűtési kapacitást biztosított a szelepfejben. A 3D nyomtatott szeleppel – különböző változatoknál – mintegy 20-30,7%-os szeleptömeg-csökkenést értek el, a szilárdságtani mutatók és a fáradásos tulajdonságok romlása nélkül.

²⁸ W. Betteridge - S. W. K. Shaw: Development of superalloys. Materials Science and Technology Volume 3, 1987 - Issue 9. pp. 682-694.<https://doi.org/10.1179/mst.1987.3.9.682>

²⁹ D. Cooper - J. Thornby - N. Blundell - R. Henrys - M.A. Williams - G. Gibbons: Design and manufacture of high performance hollow engine valves by Additive Layer Manufacturing. Materials & Design, Volume 69, 15 March 2015, Pages 44-55.

Az újtervezett szelep alkalmazásával lehetőségessé vált nagyobb emelkedésű vezérműtengely-bütyökprofil alkalmazása és a motor maximális fordulatszámának 9500 1/min értékre növelése a szeleplebegés jelensége nélkül, ami a maximálisan elérhető teljesítmény növelését eredményezte. *Az üreges kialakítású szelep feltölthető volt nátriummal, melynek következtében a motor kompresszióviszonyát 11:1 értékről 12,5:1 értékre növelhették.* A motorteszteket követően végzett μ -CT-vizsgálat nem igazolta repedés vagy jelentős deformáció jelenlétét. A kísérlet összegzett eredménye az volt, hogy habár a motor teljesítménye és gazdaságossága egyidejűleg növekedett a szelep beépítését, illetve a kompresszióviszony növelését és a vezérműtengely-bütyökprofil módosítását követően, azonban a szelep ára csak akkor válik rentábilissá, ha a sorozatgyártásban a kísérleti szelep költségének egytizedéért előállítható.

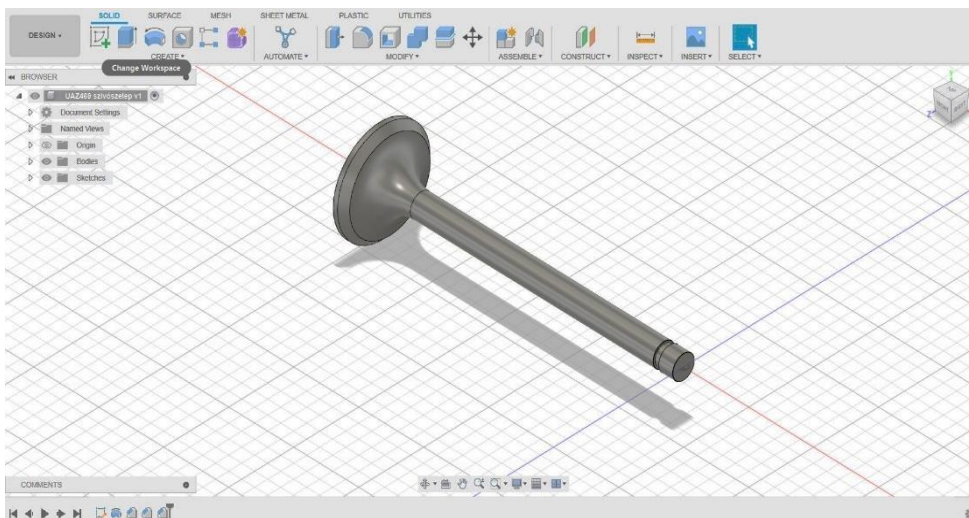
5. Inconel kipufogószelep nyomtatása ADAM fémnyomtatási technológiával

Az Inconel szelep fémnyomtatására Markforged MetalX nyomtatón került sor. Előtanulmányként, előgyártmányként azt megelőzően több műanyag szelep is kinyomtatásra került.

Először az UAZ–469B terepjáró személygépkocsi UMZ-451M típusú motorjának szelepe került modellezésre, majd ez került nyomtatásra Ultimaker S3 típusú 3D nyomtatóval. Az eredeti szelepről tolómérő segítségével készült egy műhelyrajz, amely alapján a szakdolgozatot készítő hallgató sikeresen végrehajtotta a szelep modellezését. Modellezéshez a Fusion 360 szoftvert alkalmaztuk. Ezt követően az Ultimaker Cura szoftver szeletelte a modellt. A 3D nyomtatott szelep gond nélkül beépíthető volt a jármű motorjának hengerfejébe. A nyomtatott műanyag szelep modellje látható a 4. ábrán.

A következő nyomtatási kísérlet során a Magyar Honvédségben rendszerben lévő Rába tehergépjárművekben található D0836 motor-kódú dízelmotor szelepét modellezte és tervezte át Ficsor Botond. A tervezés során az volt a cél, hogy a szelepet olyan módon optimalizálja, hogy az nátriummal hűthető legyen. A nátriummal hűtött szele-

pek esetében a szeleptányér hőmérséklete 80-100 °C-kal csökkenthető.³⁰ Nátriumhűtésű szelepeket már évtizedek óta alkalmaznak a járműiparban, azonban a 3D nyomtatott, nátriumhűtésű szelepnek még jobb lehet a hővel szembeni ellenállása, hiszen az additív gyártástechnológiának köszönhetően a szelep belsejét térhálós szerkezetűre lehet alakítani, ami hagyományos eljárásokkal kivitelezhetetlen.



4. számú ábra. UAZ–469 típusú terepjáró személygépkocsi UMZ-451M típusú motor kipufogószelepének 3D modellje Fusion 360 szoftverben (szerkesztette: Ficsor Botond)³¹

Több verzió is megtervezésre került a kísérlet során, ezek műanyag- és kompozitnyomtatóval egyaránt nyomtatásra kerültek. Egyebek mellett azért is volt szükséges a fémmnyomtatás előtt műanyag- és kompozitnyomtatóval is kinyomtatni a szelepet, mert így megismerhetővé vált, hogy a filamentes technológiákkal előbb műanyag, majd fémporos-kötőanyag filamenből hatékonyan gyártható-e egyáltalán ez a geometria.

³⁰ Dr. Dezsényi György, Dr. Emőd István, Dr. Finichiu Liviu: Belsőégésű motorok tervezése és vizsgálata Tankönyvkiadó 1992 ISBN: 963 18 4566 4 683. oldal

³¹ Ficsor Botond: Az additív gyártástechnológia helyének és szerepének vizsgálata a katonai gépjárművek alkatrész-előállítás és üzemeltetési folyamataiban, kiemelt figyelemmel a gépjárművekben alkalmazott belsőégésű hőerőgépekre. Szakdolgozat. NKE HHK, Budapest, 2024.

A gépjárműmotor-kipufogószelepek mechanikai és hőigénybevétele jellemzően nagy.³² Ezért ezeket főként magasan ötvöztött acélokból készítik, melyeket jellemzően krómmal, szilíciummal vagy mangánnal ötvöznek.³³ A kísérlet célja ebből kifolyólag az volt, hogy a tanszék ADAM technológiájú, Markforged MetalX 3D nyomtatójával kerüljön fém 3D nyomtatásra a Ficsor Botond szakdolgozatában megtervezett szelepek egyike, magas hőmérsékleten is hőszilárd Inconel 625 anyagból. A szelep nyomtatása során először D2 szerkezeti acél alapanyag került felhasználásra, majd végül lezajlott Inconel 625 alapanyagból is. (Elsősorban azért volt szükséges első kísérleti fázisban a D2 fémmel való nyomtatás, mert nem volt célszerű az ADAM technológiájú nyomtathatóság adott geometriájú munkadarabnál jelentkező lehetőségeinek és korlátjainak – deformáció, repedési hajlam, zsugorodás, méretpontosság, felületi minőség stb. – kipróbálása és felmérése nélkül a költséges Inconel alapanyag azonnali használatára.) Ahogy az korábban is említésre került, az ADAM technológia egy három lépésből álló 3D gyártási folyamat: az első technológiai művelet a nyomtatás, a második a mosás, míg a harmadik a szinterezés.

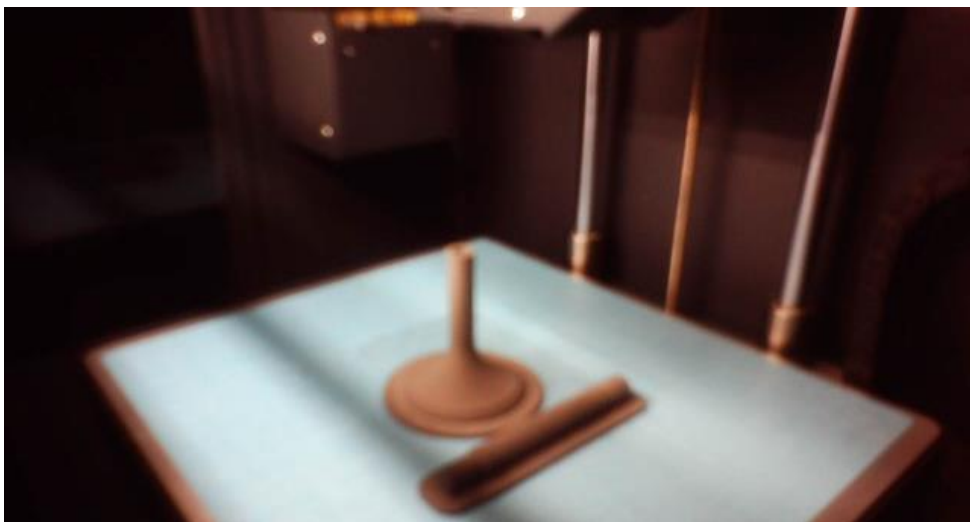
A nyomtatási folyamat során az ADAM technológia polimer mátrix fémporokat extrudál hagyományos szálhúzásos lerakási módszerrel. Az ADAM-nyomtató rétegről rétegre termoplasztikus polimerrel és viasszal összekötött fémporból állítja elő a nyomtatott tárgyakat. A nyomtatóban van egy második fej, amely egy vékony kerámia választóréteget nyomtat az esetlegesen szükséges hordozók kialakításához.

A fémonyomtatóval nyomtatott nyomtatványt, szelepet még szükséges mosni és szinterezni.

A mosási folyamat során a nyomtatott alkatrész egy mosóállomásba kerül, amely felmelegített Tergo Cleaning Fluid típusú folyadékot alkalmaz a tisztításhoz. Ebben a mosóállomásban a kötőanyag szerepét betöltött viaszt kivonják a munkadarabból. (A mosási folyamat során az alkalmazott Eiger szeletelő szoftver kiszámítja a szükséges mosási időt az alkatrész tömegének és vastagságának függvényében.)

³² Palkovics László: Belsőégésű motor kipufogószelep hőállapotának meghatározása JÁRMŰVEK MEZŐGAZDASÁGI GÉPEK 1989. évi 36. évf. 3. szám pp. 113-117.

³³ Bohner, Gscheidle, Leyer, Pichler, Saier, Schmidt: Gépjárműszerkezetek ISBN: 9789631618679 49. oldal



5. számú ábra. Felül: Rába tehergépkocsi kipufogószelep szeleptányér és szelepszár D2 szerszámacélból, üreges kivitelben. Alul: szeleptányér Inconel 625 anyagból (Fotó: Hegedűs Ernő)

A szinterelési³⁴ folyamat során az alkatrészt a szinterező kemencében kb. 22-27 órán át szinterezik, mintegy 1300 °C hőmérsékleten argon védőgázban. Az alkatrész megolvad, rétegei összeolvadnak. A polimer kötőanyag a szinterező kemencében teljesen kiég.

³⁴ Szinterelés során a hőmérséklet olvadáspont fölé emelése nélküli hőkezeléssel (vagy nyomás alkalmazásával) tömörítik és alakítják a szilárd anyagot. A szinterelés műveletét védő atmoszférában (vagy vákuum alatt) hajtják végre.



6. számú ábra. Markforged MetalX nyomtatóval nyomtatott D2 acél szelep, illetve Onyx One nyomtatóval nyomtatott, a szénszál-tartalomtól fekete Onyx kompozit szelep (Fotó: Hegedűs Ernő)

A kipufogószelep nyomtatásához figyelembe kellett venni a fémnyomtatóhoz tartozó szinterező kemence dimenzióit is. (A szeleptányért és a szelepszárat elsősorban azért volt célszerű két darabban gyártani, mert függőlegesen, egyben nem fért volna be a szinterező kamrába, illetve a karcsúság mértéke miatt hődeformáció veszélye állt fenn.) Tervezés során a 6. ábrán látható fém munkadarabot úgy tervezte a szakdolgozatot készítő hallgató, hogy az utómunkák során esztergálással kerülhet kialakításra a végső méret, így a két darab illeszthető lett. Végül a két darabot tompahegesztéssel egyesíthetjük – hiszen hagyományosan is tompahegesztést alkalmaznak szeleptányér és szelepszár egyesítésére is.



7. számú ábra. 3D nyomtatott Rába motor kipufogószelepek. Balra: a D2 szerkezeti acél szelep. Jobbra az Inconel 625 hőszilárd nikkelötvezetű anyagból mosás előtt készült sötétszürke szelep és a szinterezés utáni D2 anyagú szelep (fotó: Hegedűs Ernő)

A 7. ábrán jól megfigyelhető, hogy az első fázisban nagyobb a nyomtatott darab, mint a végleges, mert a mosást és a szinterezést követően zsugorodik a munkadarab. Fontos ugyanis megjegyezni, hogy az ADAM technológia alkalmazásakor a nyomtatás az eredeti mérethez képest akár 7-9%-os zsugorodást is szenvedhet a szinterezés során (az anyag típusától függően). A zsugorodást az alkalmazott Eiger szeletelő szoftver egy számított nyomtatási mérettűréssel kompenzálta. Mindazonáltal a nikkel-ötvözetű szelep nyomtathatóságával és gyárthatóságával kapcsolatban keletkezett tapasztalataink kedvezőek voltak, megjegyezve, hogy a 3D nyomtatott szelep nem került beépítésre a belsőégésű motor hengerfejébe.

Összegzés és következtetések

A tanulmány megvizsgálta a magas hőszilárdságú, üreges, nátrium-hűtésű Inconel kipufogószelep additív gyártásának lehetőségeit, és ismertetett egy ADAM technológiával végzett szelepnymtatási kísérletet. Összegzésképpen megállapítható:

- a turbófeltöltött gépjármű dízelmotorok fejlesztésének új irányzata, a Hot in V, Hot Side Inside vagy Heisse Seite Innen – HSI - turbómotor-építési mód, amelynél a kipufogógáz gázhőmérséklete a turbófeltöltő belépő keresztmetszeténél elérheti akár a 860 °C értéket, igényli a mintegy 700 °C-ig hőálló Inconel kipufogószelep alkalmazását, akárcsak a katonai alkalmazású keramizált-adiabatikus vagy LHR dízelmotor-konstrukciók;
- az ADAM fémnyomtatási technológia fokozottan alkalmas zárt belső üregek gyártására, így szerepe a nátriumtöltésű kipufogószelepek gyártása területén a jövőben jelentős lehet;
- az Inconel 625 anyagú, áttervezett Rába D0836 turbódízelmotor kipufogószelep nyomtatására ADAM fémnyomtatási technológiával, Markforged MetalX nyomtatón került sor, a tapasztalatok a nyomtathatósággal, gyárthatósággal és a költségekkel kapcsolatban is egyaránt kedvezőek voltak, nem tapasztaltunk deformációval, repedéssel, zsugorodással, méretpontatlansággal, felületi minőségromlással kapcsolatos problémákat a gyártás során.

A lehetőségek függvényében a jövőben elképzelhető a kísérlet folytatása.

Köszönetnyilvánítás: A 2022-2.1.1-NL-2022-00012 azonosító számú Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratóriuma projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2022-2.1.1-NL Nemzeti Laboratóriumok Létrehozása, Komplex Fejlesztése pályázati program finanszírozásában valósul meg.

Források

Aircraft propulsion. Smithsonian Air and Space Museum, Books Express Publishing, 2011. https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/18674/SAoF-0001.4-Lo_res.pdf?sequence=3&isAllowed=y (2024.05.11)

Anyagvizsgálók Közlönye, 1940. 18. évfolyam, 4. szám. 171. o.

Bohner, Gscheidle, Leyer, Pichler, Saier, Schnidt: Gépjárműszerkezetek ISBN: 9789631618679

Colwell: The development of sodium cooling of exhaust valves. Automotive Industries, vol. 82, no. 9 (May 1, 1940), pp. 417-418.

D. Cooper - J. Thornby - N. Blundell - R. Henrys - M.A. Williams - G. Gibbons: Design and manufacture of high performance hollow engine valves by Additive Layer Manufacturing. Materials & Design, Volume 69, 15 March 2015, Pages 44-55.

Dezsényi Gy. – Emőd I. – Finichiu L.: Belsőégésű motorok tervezése és vizsgálata. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1999.

Dr. Dezsényi György, Dr. Emőd István, Dr. Finichiu Liviu: Belsőégésű motorok tervezése és vizsgálata Tankönyvkiadó 1992 ISBN: 963 18 4566 4

Dr. Nádasi Antal – Nagyszokolyai Iván: Nagysebességű laboratóriumok. Technika, 1973. 17. évfolyam, 7. szám, 7. o.

Dr. Nagyszokolyai Iván: Audi V8-TDI. <http://www.lezo.hu/szerkezet-tan/hajtas/motor/dizel/PDF/Dizelek-fejlesztese.pdf> (2024.02.27.)

Dr. Nagyszokolyai Iván: Tanuljunk újdízelül! <https://autotech-nika.hu/cikkek/motor-eroatvitel/11488/tanuljunk-ujdizeluel> (2024.02.27.)

Dr. Vég Róbert – Dr. Hegedűs Ernő: Dízelmotorok feltöltése és hűtése, különös tekintettel a katonai felhasználásra tervezett konstrukciókra I-II. rész. Haditechnika 2016/6; 2017/1. sz.

Dr. Zentay Péter – Dr. Hegedűs Ernő – Végvári Zsolt: A 3D nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei I-III. rész. Haditechnika 57. évf. 2022 -2023. évi 6.;1.; 2.. sz.

Dr. Zsidai László – Dr. Sarankó Ádám – Szabó Péter: Az additív technológiák terméktervezési és technológiai sajátosságai Magyar Mérnöki Kamara Kiadványsorozata. 111. Gépészeti Tagozat. Gödöllő, 2023. október.

Evan Williams: What is a Hot V Engine and How Does It Work?

<https://www.autoguide.com/auto-news/2018/12/what-is-a-hot-v-engine-and-how-does-it-work-.html> (2024.10.23.)

Ficsor Botond: Az additív gyártástechnológia helyének és szerepének vizsgálata a katonai gépjárművek alkatrész-előállítási és üzemeltetési folyamataiban, kiemelt figyelemmel a gépjárművekben alkalmazott belsőégésű hőerőgépekre. Szakdolgozat. NKE HHK, Budapest, 2024.

Ficsor Botond: Fém 3D nyomtatás alkalmazásának lehetséges előnyei belsőégésű hőerőgépek fejlesztése és gyártása során, polgári és katonai aspektusból Nemzeti Közzolgálati Egyetem, 2023 tavaszi Intézményi Tudományos Diákköri Konferencia

Ficsor, Botond (2024) A 3D-s fémnyomtatás, mint a gépjárműmotorok gyártásának ígéretes jövőbeni technológiája. Haditechnika, 58 (1). pp. 50-54. ISSN 0230-6891

Ficsor, Botond és Hegedűs, Ernő: A 3D fémnyomtatás alkalmazhatóságának vizsgálata MALE-kategóriájú UAV-dízelmotor fejlesztésre: 3D nyomtatással gazdaságosan gyártható könnyített szerkezetű alkatrészek és részegységek a repülő szakterületen. KATONAI LOGISZTIKA, 2023. évi 31. évf. 1-2. sz. pp. 38-72. ISSN 1588-4228

Gyarmati József: Lánctalpas jármű kormányzása és ennek 3D modellezése Műszaki Katonai Közlöny 33. évf. 2023. évi 3. szám pp. 51-61. doi:10.32562/mkk.2023.3.5

Inconel. "Strategically important metals." House of Commons Science and Technology Committee Report. <http://www.publications.parliament.uk/pa/cm201012/cmselect/cmsctech/726/726.pdf> (2012.12.02.)

Kalmár István – Stukovszky Zsolt: Belsőégésű motorok folyamatai. Műegyetemi Kiadó, Budapest. 1998. 341. o.

Kovács, Zoltán Tibor - Ember, István - Daruka, Norbert - Vég, Róbert - Dénes, Kálmán: Harctéri 3D- nyomtatók alkalmazási lehetőségei és

alapvető technikai követelményei HADTUDOMÁNYI SZEMLE 17: 2 pp. 5-15., 11 p. (2024)

Lewis Kingston: What is a 'hot V' configuration? <https://www.piston-heads.com/news/general-pistonheads/what-is-a-hot-v-configuration-ph-explains/38096> (2018.05.27.)

Palkovics László: Belsőégésű motor kipufogószelep hőállapotának meghatározása JÁRMŰVEK MEZŐGAZDASÁGI GÉPEK 1989. évi 36. évf. 3. szám pp. 113-117.

Rákosi Sára - Sebők István - Szalai Tamás - Dr. Vég Róbert László: A 3D nyomtatás biztonságtechnikai és környezetvédelmi aspektusai Katonai Műszaki Közlöny 33. évf. 1. sz. pp. 133–148. doi: 10.32562/mkk.2023.1.10

Ryan Hirons: What Is A Hot V Turbo Engine, And What Are The Benefits? <https://www.carthrottle.com/news/what-hot-v-turbo-engine-layout-and-what-benefits-does-it-have>

The Audi 4.0l V8 TFSI engine from the EA825 series eSelf Study Program 920493. <https://static.nhtsa.gov/odi/tsbs/2020/MC-10172005-0001.pdf>

Vég Róbert László: Belsőégésű motorok I-II.-III. kötet. Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Bolyai János Katonai Műszaki Főiskolai Kar, Budapest, 2001-2003.

Végvári Zsolt: A 3D nyomtatás felhasználási lehetőségei a műveleti logisztikában Katonai logisztika 2023. évi 1-2. szám. 177-198. DOI:10.30583/2023-1-2-177

W. Betteridge - S. W. K. Shaw: Development of superalloys. Materials Science and Technology Volume 3, 1987 - Issue 9. pp. 682-694. <https://doi.org/10.1179/mst.1987.3.9.682>

Zentay Péter - Gyarmati József: „Vitézek” a Vörös téren II. rész - Harckocsik és harckocsi támogatók. HADITECHNIKA, LIII. évf., 2019. évi 4. szám, DOI: 10.23713/HT.53.4.05.