

Kocsis Bence¹

Az additív és szubsztraktív technológia katonai vonatkozású alkalmazási lehetőségeinek összehasonlító vizsgálata²

Comparative Examination of Additive and Subtractive Technology for Military Application

A katonai célú fejlesztések mindig az élvonalat képviselik az innováció és technológia területén. Az additív technológia a 21. századi gyártástechnológia egy új és egyre meghatározóbb elemévé vált napjainkra. A tervezői szabadság és a feldolgozható anyagösszetételek új tárháza megannyi innovatív alkalmazási lehetőséget rejt magában mind a hétköznapi, mind pedig a katonai célú felhasználások területén. Ebben a hiánypótló tanulmányban ismertetem a technológia nyújtotta lehetőségeket, néhány ipari példán keresztül bemutatva azt, illetve összehasonlító vizsgálatot végzek az additív³ és szubsztraktív⁴ gyártástechnológia között. Végezetül pedig javaslatot teszek ezen új technológia implementálására néhány katonai eszköz esetében.

Kulcsszavak: additív technológia, fém 3D nyomtatás, súlycsökkentés, katonai alkalmazások, nyomtatott alkatrészek

Military developments are always at the forefront of innovation and technology. Additive technology has become a new and increasingly important element of the 21st century manufacturing technology. The design freedom and opportunities of workable material compositions offer many innovative applications in both everyday and military applications. In this supplementary study, I present the possibilities offered by this technology, showing it through some industrial examples and doing

¹ Széchenyi István Egyetem, járműmérnök PhD-hallgató, e-mail: kocsis.bence@sze.hu, ORCID: 0000-0003-4751-5071

² Jelen kutatás az EFOP-3.6.1-16-2016-00017 projekt támogatásával valósult meg.

³ Additív technológia: a formázó és leválasztó eljárásokkal ellentétben ez egy felépítő eljárás, mely hulladék keletkezése nélkül építi fel rétegről rétegre a munkadarabot.

⁴ Szubsztraktív technológia: a formázó és leválasztó eljárások tartoznak ebbe a csoportba, amelyek során jellemzően valamilyen előgyártmányból anyagleválasztás útján érjük el a kívánt geometriát.

a comparative study between additive and subtractive manufacturing technology. Finally, I propose the implementation of this new technology for the production of some military devices.

Keywords: additive technology, metal 3D printing, weight reduction, military applications, printed parts

Bevezetés

A hadviselés az emberiséggel egyidős cselekvés, amelynek fejlesztésére és korszerűsítésére mindig komoly erőforrásokat különítettek el az uralkodó személyek, kormányok, államok. Számos történelmi jelentőségű háború ismert, amelyeket egy-egy új fejlesztésű fegyver, katonai jármű vagy védelmi eszköz bevetése akár sorsdöntően befolyásolt. Jelen tanulmányban egy ilyen lehetséges fejlesztési irányként egy újszerű gyártástechnológia alkalmazási lehetőségeit vizsgáltam, amely a hadviselés szinte minden területén alkalmazható, a járműgyártástól kezdve, a gyalogsági felszerelés súlycsökkentésén át egészen az elsősegélynyújtásig. Ez a technológia az additív gyártástechnológia elnevezést kapta, mivel anyag hozzáadásával rétegről rétegre építi fel az eljárás során a munkadarabot, szemben az eddig használt szubsztraktív, azaz lebontó eljárásokkal, ahol a felesleges anyagmennyiséget forgácsolással, marással stb. távolítják el. A következőkben bemutatom ezen technológia alkalmazási lehetőségeit a hadiiparban, néhány alkalmazási példán keresztül.⁵

Additív technológia (AM) ismertetése

A gyors prototípusgyártási technológiák 1983. március 9. óta állnak rendelkezésünkre, amikor is a 3D Systems munkatársa, Charles W. Hull bemutatta az első felépítő eljárást alkalmazó berendezését, az SLA-1-et (SLA – Stereolithography Apparatus).⁶ Az első ilyen technológiát UV-fényre érzékeny folyékony polimerek feldolgozására fejlesztették ki. Az 1. táblázat foglalja össze az eddig ismert AM (Additive Manufacturing)-technológiákat. Alkalmazását tekintve ezeket két csoportra bonthatjuk. Készíthetünk velük prototípust, amelyek vizuális modellként szolgálnak a tervezés korai fázisában, vagy pedig funkcionális modelleket alkothatunk velük, ahol a modell nemcsak geometriai méreteiben, de fizikai tulajdonságainak egy részében is megegyezik a termékkel. Funkcionális modell alkalmazását tekintve lehet késztermék, szerszám vagy indirekt módon történő szerszámgyártás mesterdarabja.

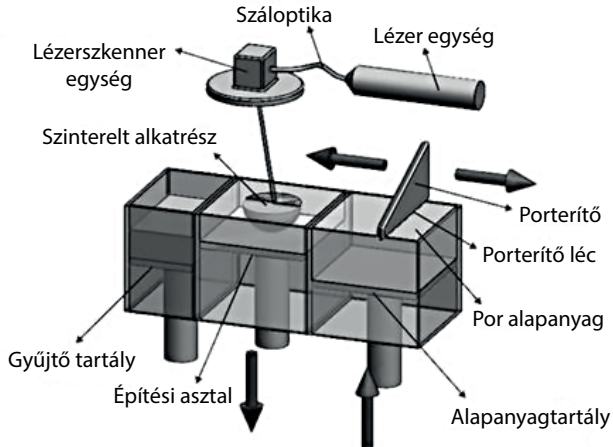
Az additív gyártás alkalmazásának hatása egészen a tervezési folyamatig nyúlik vissza. Egyrészt a tervező kezébe ad egyfajta tervezési szabadságot azzal, hogy a klasszikus megmunkálási eljárások szabta korlátokkal nem kell foglalkoznia, használhat például íves, formakövető furatokat, üreges szerkezeteket belső merevítő szerkezettel ellátva, nem szabványos, vagy változó paraméterű méreteket (például furatátmérő, menetemelkedés), terhelésre optimalizált és könnyített szerkezeteket stb.⁷

⁵ HORVÁTH et al. 2018.

⁶ HULL 1986.

⁷ HATOS–KOC SIS–HARGITAI 2018.

Részletesebben a közvetlen lézer szinterezési eljárást – Direct Metal Laser Sintering – mutatom be, amelynek elvi felépítését az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra. DMLS-berendezés felépítése

Forrás: LONGHITANO et al. 2015

1. táblázat. Additív technológiák csoportosítása a felhasznált alapanyag tekintetében

Alapanyag	Eljárás	Előkészítés	Rétegtépcsési technika	Fázisváltozás	Jellemző anyagok	Alkalmazás
Folyadék	SLA	Folyékony gyanta tartályban.	Lézer szkennelés/fényvetítés.	Fotopolimerizáció.	UV-reagens anyagok, kerámia-szuszpenziók.	Prototípustermékek, öntőszerszámok.
	MJM	Folyékony polimer fúvókában.	Polimersugaras nyomtatás.	Hűtés és fotopolimerizáció.	UV-reagens akril polimer, viasz.	Prototípustermékek, öntőszerszámok.
	CLA	Folyékony gyanta tartályban.	Aktuális metszeti perspektíva, fényvetítése.	Fotopolimerizáció.	UV-reagens polimer gyanták.	Prototípustermékek.
	RFP	Folyékony cseppek fúvókában.	Cseppek felrakása.	Szilárdulás dermedés révén.	Víz.	Prototípustermékek, öntőszerszámok.
Szál/pasztá	FDM	Olvadtszál fúvókában.	Folyamatos extrúzió és felépítés.	Hűtés általi megszilárdulás.	Termoplasztikus polimerek, viasz.	Prototípustermékek, öntőszerszámok.
	Robocasting	Pasztá fúvókában.	Folyamatos extrúzió.	–	Kerámiapaszták.	Funkcionális prototípus.
	FEF	Pasztá fúvókában.	Folyamatos extrúzió.	Szilárdulás hűlés és befagyás révén.	Kerámiapaszták.	Funkcionális prototípus.

Alapanyag	Eljárás	Előkészítés	Rétegtévképzési technika	Fázisváltozás	Jellemző anyagok	Alkalmazás
Por	SLS	Por tartályban.	Lézerszkennelés.	Részleges megolvadás.	Termoplasztikus polimerek, viasz, fém vagy kerámiaporok.	Prototípuskészítések, termékek, mesterminták, kerámiaformák.
	SLM	Por tartályban.	Lézerszkennelés.	Teljes átolvadás.	Fémpor.	Szerszámok, funkcionális prototípusok.
	EBM	Por tartályban.	Elektronnyaláb szkennelés.	Teljes átolvadás.	Fémpor.	Szerszámok, funkcionális prototípusok.
	LOM	Porfecs-kendőzés fűvókán keresztül.	Porfecs-kendőzés és megolvadás lézerrel.	Teljes átolvadás.	Fémpor.	Szerszámok, alkatrészjavítás, funkcionális prototípusok.
	3DP	Por tartályban.	Szelektív csepegtetés.	-	Polimer-, fém- vagy kerámiaporok.	Prototípus, szerzámok.
Szilárd lap	LOM	Lézervágás.	Lapdagolás és adhéziós ragasztás.	-	Papír-, műanyag-, fémlemezek.	Prototípus, öntőminták.

Forrás: GUO–LEU 2013

Az eljárás lényege, hogy az adott szemcseméret-tartományba eső fémpor alapanyagból a nagy energiájú lézer segítségével közvetlenül előállíthatjuk a 3D-s terméket. A portartályba elhelyezett alapanyagból egy adott mennyiséget a porteretítő minden ciklus elején egyenletesen elteríti a munkasztalon, majd pedig a nagyenergiájú lézer a 3D-s modell adott szelete alapján végigpáztazza a munkaterület megfelelő részeit. A felesleges pormennyiséget a porteretítő a harmadik térrészbe húzza, ahol a többlet por tárolására szolgáló tartály található. A teljes építési folyamat végeztével a munkasztalról el kell távolítani a meg nem olvadt port, amelyet az alapanyagtartályba egy szitán keresztül azonnal vissza is lehet juttatni. A munkadarab leválasztása a munkasztalról történhet manuálisan, vagy valamilyen CNC-berendezés segítségével. A támaszok letörését és az esetleges utómunkálatokat követően az alkatrészt használatba is lehet helyezni. Az így előállított alkatrész teljes mértékben azonos tulajdonságokkal rendelkezik, mint a hagyományos módon előállítottak, hőkezelhetők, hegeszthetők, forgácsolhatók, bevonatolhatók.⁸

Technológiák összehasonlítása

A felépítő gyártástechnológia folyamatosan formálja át a gyártás világát, amelyben egyre nagyobb szerepet kap. Hatása egészen a tervezés fázisáig nyúlik vissza. Egyrészt a konvencionálisan nem, vagy csak nehezen megmunkálható alkatrészek is könnyedén legyárthatóvá váltak, másrészt a tervezőknek nem kell rendelkeznie gyártástechnológiai tudással. Elegendő néhány ökol-szabályt ismernie, mint például a legkisebb még nyomtatható furatátmérő vagy falvastagság,

⁸ HATOS et al. 2018; HATOS–ZSOLDOS 2013.

alátámasztás nélkül még nyomtatható alámetszések. Ezenfelül további előnye, hogy a gyártást közvetlenül csak a tervezés előzi meg, amely végeztével közvetlenül a 3D-modellből lehetséges a gyártás, mindössze annyit kell tenni, hogy a modellt a megfelelő formátumban kell kimenteni, a rétegvastagsággal megegyező szeletekre kell feldarabolni és alapanyagot kell választani. Ezeket a lépéseket sok esetben már a nyomtató szoftverében, egy programon belül meg lehet tenni. Ezzel némiképp a tervezési és gyártási folyamat is egyszerűsödik, felgyorsul. Az eljárás nem igényel szerszámozást, készülékgyártást és egyéb járulékos eszközöket, emberi jelenlét is jellemzően csak a berendezés kezdeti beállításához és a folyamat végén a kész munkadarab eltávolításához, a gép alaphelyzetbe állításához szükséges. A gyártási idő nagyon bonyolult, forgácsolással nehezen megmunkálható, illetve kisméretű és nagy darabszámú alkatrészek esetében rövidebb vagy közel azonos, mint a klasszikus technológiák esetében, azonban nagyobb térfogatú és egyszerűbb daraboknál ez már nem mondható el. Kompenzálásként a gyártógépek darabszáma növelhető, amely nem törvényszerűen növeli az ellátó személyzet létszámát is.

A 2. táblázatban részletesen összehasonlítottam a két technológia meghatározó paramétereit.

2. táblázat. Összehasonlító táblázat a hagyományos és additív technológia különböző paramétereiről

	Hagyományos	Additív
Alapanyag	Előgyártmány (tömb vagy kör keresztmetszetű).	Por, gyanta, filament.
Gyártást megelőző lépések	Gyárthatóság ellenőrzése, gyártásterv készítése, CNC-pálya generálása.	Támaszanyag generálása, modell felszeletelése.
Termékgeometria kialakítása	Rétegről rétegre történő anyagleválasztással történik.	Rétegről rétegre történő anyagfelhordással történik.
Szerszámozást/készülékezést igényel a technológia	Igen.	Nem.
Utómunkálás szükséges	Igen.	Igen.
Alapanyag újrahasznosítható	Nem.	Igen.
Gépkezelő személyzet	Szakképzett.	Nem igényel szakképzett munkaerőt.
Gép felügyeletének igénye	Személyes jelenlét.	Online monitoring.
Munkadarabcseré	Tokmány/készülék oлдása, szerszámcsere (igény esetén), nullpont felvétele.	Munkalap kicserélése.

Forrás: a szerző szerkesztése

A gyors, egyénre szabott és a helyszíni utánpótlás-kritériumok teljesítésére tökéletes megoldásként jelen tudásunk szerint csak az additív technológiák felelnek meg. Legyen szó az elsősegélynyújtásról, fegyver vagy lőszergyártásról, járműalkatrész gyártásáról stb.

Katonai vonatkozású alkalmazási példák

Az egészségügy területén sok helyen már rutinszerűen alkalmazzák a 3D-nyomatás technológiáját, mint például szájszészeti vagy ízületi implantátumok egyedi gyártására. Léteznek azonban már biokompatibilis vagy esetleg organikus anyagok nyomtatására alkalmas berendezések is. A legújabb tanulmányok szerint már képesek biokompatibilis emberi fület vagy élő sejtet nyomtató berendezéssel például vesét vagy méhet nyomtatni. Transzplantációról még nem tudni, de hasonló módon ültettek már be például húgyhólyagot. Egy nemrég publikált tanulmány szerint pedig emberi bőrt is lehetséges nyomtatni. A bioprinter képes mintavétel alapján az egyén saját sejtjeiből felépített anyagból pótolni az égett bőrszövet hiányzó részeit egy szkenneléssel létrehozott modell alapján. Ezt megelőzően biopszia útján mintát kell venni a dermális fibroblaszt és a felhám keratinsejtjeiből. Az így kapott minta alapján a bionyomtató képes a páciens saját szövetszerkezetének megfelelő bőrral pótolni az égett seb felületét. Ez azért nagyon fontos, mert az egyik fő kockázati tényező a nagyobb égési sérülések esetén a kilökődés és elfertőződés veszélye.

A fent említett egészségügyi példák egy része a jövőben talán a katonai elsősegélynyújtás elemei lesznek.

A másik nagyon célszerű katonai alkalmazása az additív technológiának a helyszíni cserealkatrész biztosítása jelentősebb logisztikai költség és szállítási idő nélkül. Ennek feltétele, hogy rendelkezünk az adott alkatrész 3D-s modelljével. Amennyiben a hadsereg rendelkezik az eszközeinek 3D-s összeállítási modelljével, akkor minden alkatrészt a megfelelő por alapanyag segítségével elő tudják állítani a gép méretkorlátain belül. Ez nagy előnyt jelent az alapanyag utánpótlását illetően, mivel standard csomagolású, egységes morfológiájú por az alapanyag, így nem kell azzal bajlódni, hogy milyen geometriájú és méretű előgyártmányokat kell a rakományhoz készíteni. Nem mellékes az sem, hogy az így a hadszíntérre szállított por szinte teljes egészében valamilyen alkatrészekbe fog beépülni és csak elenyésző mennyiségű hulladékpor keletkezik. Számos alkalmazási példát publikáltak már, például az Amerikai Egyesült Államok Hadseregének Fegyverzet Kutatási, Fejlesztési és Mérnöki Központja (ARDEC) is, ahol többek között az alábbi képen látható RAMBO típusú gránátvetőt nyomtatták ki polimer és fém 3D-nyomtatóberendezések segítségével. A gránátvetőhöz nyomtattak töltényeket is, amelyekkel aztán tesztelték is a nyomtatott fegyvert.



2. ábra. Az első ARDEC által készített 3D-nyomatott gránátvető, amelyből 3D-nyomatott lőszeret sütöttek el

Forrás: SEUNG-JAMES 2017

A gránátvető mellé lőszeret is készítettek, amelyek a 3. ábra bal oldalán láthatók. A 3. ábra jobb oldali képen pedig az egyik alkatrész hagyományos (alsó) és additív (felső) módon előállított prototípusa látható. A nyomtatással készült minta előnye, hogy egyszerre készültek az alkatrészei ugyanazon a gépen, alig 35 óra alatt, számos részegysége cserélhető, egyénre szabható és a költsége is messze a hagyományosan készített gránátvetőé alatt maradt. A fegyver alkatrészeinek 90%-a készült nyomtatással.



3. ábra. 3D-nyomatott lőszer (bal) és egy 3D-nyomatott és az eredeti alkatrész összehasonlító képe látható

Forrás: SEUNG-JAMES 2017

A technológia terjedésével egyidejűleg egyre szélesebb a spektruma az elérhető alapanyagoknak is. Az Egyesült Államok Hadserege CCDC kutatóközpontjának fejlesztése például az AF96 acélpor, amely 50%-kal jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, mint a kereskedelmi

forgalomban elérhető anyagok. Ezen anyagok tesztelése és éles bevetésen történő alkalmazása még folyamatban van, de a tesztüzemük, hadgyakorlatokon történő alkalmazásuk sikerrel zárult. Az ipari beszállítók is egyre nyitottabbak az AM-technológia alkalmazására, ilyen például a General Electric Aviaton csoport, amely az Egyesült Államok hadseregének beszállítója. Egy korábbi T700-as motort fejlesztettek tovább, amelyet T901-es névre kereszteltek, amit többek között a Boeing AH-64 Apache és Sikorsky UH-60 Black Hawk helikopterekbe szerelnek.



4. ábra. GE Aviation T901-GE-900-as motorja

Forrás: www.geaviation.com/military/engines/t901-turboshaft-engine (A letöltés dátuma: 2019. 03. 01.)

A T901-es motor gyártásánál számos technológia mellett az additív gyártás adta lehetőségeket is kiaknázták a GE mérnökei. Ennek eredményeként a 4. ábrán látható új költséghatékony koncepció készült el rövidebb fejlesztési idő alatt, mint elődei, kisebb üzemanyagfogyasztással bír, köszönhetően a súlycsökkentésnek. Mindezek mellett az élettartamtesztek is jobb eredményt hoztak, mint az előző típusnál. A gyártó által közölt adatok alapján a korábbi T700-as motorba beépülő 51 alkatrészt a T901-es motornál már egyetlen nyomtatott alkatrészként sikerült legyártani, aminek köszönhetően 20%-kal csökkent az alkatrész tömege.

Összefoglalás

Írásomban bemutattam az additív technológia jelenlegi lehetséges megvalósításait és kategorizáltam azokat. Részletesen bemutattam a Széchenyi István Egyetem Anyagtudományi és Technológiai Tanszékén megtalálható EOS M270-es lézerszinterező berendezés működését. Összehasonlítottam a szubsztraktív és additív gyártástechnológiákat, katonai vonatkozásukat

helyezve előtérbe. Áttekintettem az elérhető szakirodalmi forrásokat és megállapítottam, hogy bár ismert és egyre elterjedtebb technológia a legtöbb iparágban az additív módon történő gyártás, a katonai vonatkozású alkalmazásai még csak most kezdenek megjelenni. Javaslatot tettem néhány jövőbeli katonai alkalmazási példára, bemutattam a hadiipari additív technológia aktuális megoldásait, azok előnyeire fókuszálva, néhány ily módon készült eszközön. Kutatásommal elő szeretném segíteni a technológia hazai terjedését, szélesebb körökben történő alkalmazását és ismeretét, hogy már a tervezés fázisában kiaknázhassák előnyeiket.

Felhasznált irodalom

- ALBANNA, Mohammed et al. (2019): In Situ Bioprinting of Autologous Skin Cells Accelerates Wound Healing of Extensive Excisional Full-Thickness Wounds. *Scientific Reports*, Vol. 9. Elérhető: www.nature.com/articles/s41598-018-38366-w (A letöltés dátuma: 2019. 03. 01.) DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38366-w>
- GUO, Nannan – LEU, Ming C. (2013): Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol. 8, No. 3. 215–243. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
- HATOS István – ZSOLDOS Ibolya (2013): Fémporok lézeres szinterézése. *A jövő járműve: Járműipari innováció*, Vol. 1/2, 28–30.
- HATOS, István – FEKETE, I. – IBRIKSZ, Tamás – KOCIS, Bence – NAGY, András Lajos – HARGITAI, Hajnalka (2018): Effect of locally increased melted layer thickness on the mechanical properties of laser sintered tool steel parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 426, No. 1. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/426/1/012014>
- HATOS, István – KOCIS, Bence – HARGITAI, Hajnalka (2018): Conformal cooling with heat-conducting inserts by direct metal laser sintering. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 448, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012027>
- HORVÁTH Péter – BALLAGI Áron – NAGY Attila – KUTI Rajmund (2018): Az exoskeleton katonai alkalmazási lehetőségei. *Műszaki Katonai Közlöny*, 28. évf. 2. sz. 35–42.
- HULL, Charles W. (1986): *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. United States Patent.
- KULCSÁR Klaudia – KÓNIA János (2017): *Kortikális megtámasztású egyéni implantátum korszerűsítése*. XVIII. Műszaki Tudományos Ülésszak előadása, Kolozsvár. DOI: <https://doi.org/10.33895/mtk-2018.08.06>
- LARONDA, Monica M. – RUTZ, Alexandra L. – XIAO, Shuo – WHELAN, Kelly A. – DUNCAN, Francesca E. – ROTH, Eric W. – WOODRUFF, Teresa K., SHAH, Ramille N. (2017): A bioprosthetic ovary created using 3D printed microporous scaffolds restores ovarian function in sterilized mice. *Nature Communications*, Vol. 8, Article No. 15261. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms15261>
- LONGHITANO, Guilherme Arthur – LAROSA, Maria – JARDINI, André – ZAVAGLIA, Cecília – IERARDI, Maria C. (2015): Surface Finishes for Ti-6Al-4V Alloy Produced by Direct Metal Laser Sintering. *Materials Research*, Vol. 18, No. 4. DOI: <https://doi.org/10.1590/1516-1439.014415>
- MANNOR, Manu S. – JIANG, Ziwen – JAMES, Teena – KONG, Yong L. – MALATESTA, Karen A. – SOBOYEJO, Winston O. – GRACIAS, David – VERMA, Naveen – MCALPINE, Michael C. (2013): 3D Printed Bionic Ears. *Nano Letters*, Vol. 13, No. 6. 2634–2639. DOI: <https://doi.org/10.1021/nl4007744>

Internetes források

- ATALA, Anthony (2011): *Printing a human kidney*. TED Ed. Elérhető: <https://ed.ted.com/lessons/printing-a-human-kidney-anthony-atala> (A letöltés dátuma: 2019. 03. 01.)
- MCWILLIAMS, Brandon (2019): *Researchers 3-D print ultra-strong steel parts from powder*. Elérhető: www.arl.army.mil/www/default.cfm?article=3371 (A letöltés dátuma: 2019. 03. 01.)
- SEUNG, Kook B. – JAMES, Zunino (2017): *RAMBO's premier*. Elérhető: <https://asc.army.mil/web/news-alt-amj17-rambos-premiere/> (A letöltés dátuma: 2019. 03. 01.)
- www.geaviation.com/military/engines/t901-turboshaft-engine (A letöltés dátuma: 2019. 03. 01.)