

Papp István<sup>1</sup>

## RAKÉTAHAJTÓMŰVEK ÜZEMELTETÉSÉNEK BIZTONSÁGI MEGOLDÁSAI<sup>2</sup>

### Rezümé

A rakéta az akció-reakció elv alapján működő repülő szerkezet, amely a meghajtásához szükséges tüzelőanyagot és oxidálóanyagot is magával szállítja. Az üzemeltetéshez szükséges összes anyag (tüzelőanyag és oxidáló anyag) a rakétahajtóművel felszerelt repülőeszköz fedélzetén rendelkezésre áll. Az ilyen eszközök légüres térben (a világűrben) is képesek tolóerőt biztosítani. Összességében elmondható, hogy a rakétahajtómű olyan különleges sugárhajtómű, amely működéséhez nem a légköri oxigént használja. A cikkben bemutatásra kerül ezen eszközök biztonságos üzemeltetésével kapcsolatos fontosabb üzembiztonsági megoldások.

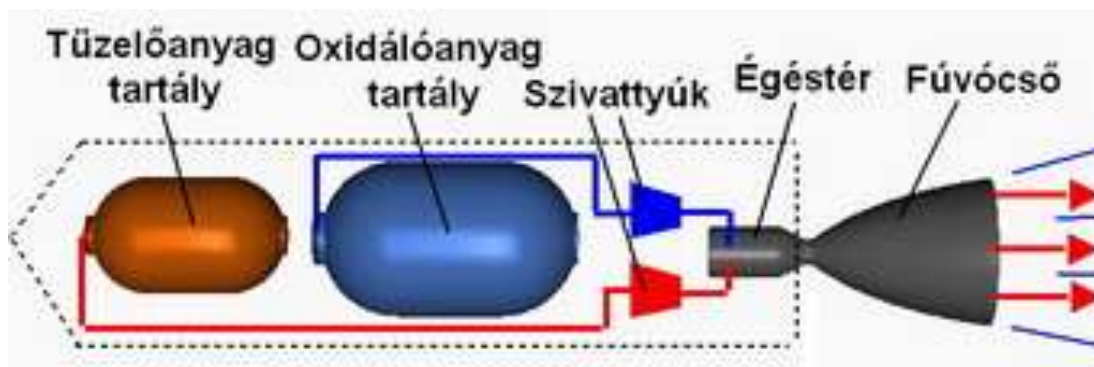
### SECURITY SOLUTIONS OF THE MISSILES PROPULSION MAINTENANCE

### Resume

The missile work in to the action-reaction principle operating aircraft structure, which is needed to propel you even deliver fuel and oxidizing agents. All materials needed for the operation (fuel and oxidizing agent) to the rocket engines installed on board aircraft equipment is available. Such devices in a vacuum (in space) are also able to provide thrust. Overall, the specific thrust jet engine, which works without using oxygen in the atmosphere. This article is presented in the safety management of these assets is more important safety solutions.

## A RAKÉTAHAJTÓMŰVEK FELÉPÍTÉSE

A munkaközeg felgyorsításának módja szerint a hajtóművek kémiai, atom- és elektromos hajtóművek lehetnek. Az utóbbi években kifejlesztésre került és tesztelés alatt álló ionhajtóműveken pl. elektromos tér gyorsítja a kiáramló ionokat. [1]

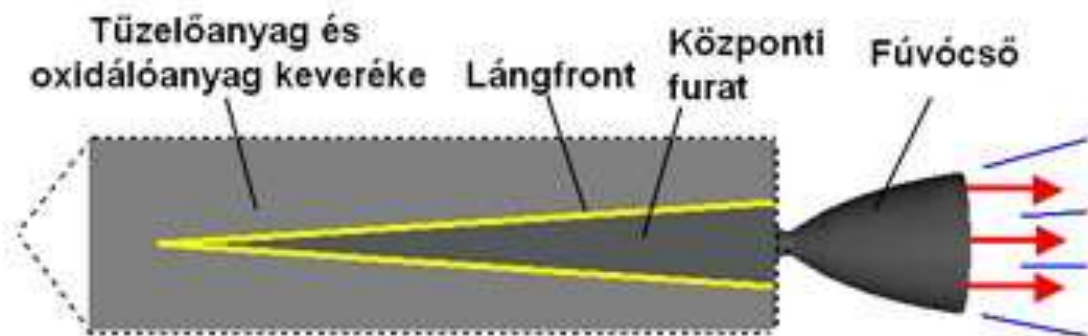


1. ábra [1]

<sup>1</sup> okl. mk. hdgy, tanársegéd, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, papp.istvan@uni-nke.hu

<sup>2</sup> Lektorálta: Dr. Szilvássy László okl. mk. alez; egyetemi docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, szilvassy.laszlo@uni-nke.hu

Az 1. ábrán a folyékony, a 2. ábrán pedig a szilárd hajtóanyaggal működő rakétahajtómű elvi felépítése látható.



2. ábra [1]

## A RAKÉTAHAJTÓMŰVEK OSZTÁLYOZÁSA

A rakétahajtóműveknek számos fajtája létezik, amelyeket alapvetően kétféle típusba sorolható:

- A folyékony üzemanyaggal működő rakétahajtóművek:
  - leggyakrabban alkalmazott üzemanyagok: kerozin, folyékony hidrogén, hidrazin, etanol;
  - oxidálóanyagok: cseppfolyós oxigén, nitrogén-tetroxid, hidrogén-peroxid;

A XX. századi rakétakutatás és űrhajózás úttörői Ciolkovszkij, Goddard és Oberth dolgozták ki a többlépcsős folyékony hajtóanyagú rakéta részleteit. [1]

- A szilárd hajtóanyaggal működő rakétahajtóművek leggyakrabban finom alumínium por (üzemanyag) és ammónium-perklorát (oxidálószer) keverékét alkalmazzák. Ezeket nagymolekulájú anyagokkal (pl. polibutadién-akrilnitril-polimer (PBAN) vagy terminált hidroxil-polibutadién (HTPB) kötnek meg szilárd keverékké, melyek üzemanyagként is szolgálnak.

Egy másik csoportosítás szerint, a szilárd hajtóanyaggal működő hajtóművek lehetnek:

- homogén szilárd hajtóanyagok, amelyek kötött formában tartalmazzák az oxigént (pl. oldószerrel zselatinált nitrocellulóz);
- heterogén szilárd hajtóanyagok, amelyekben a tüzelőanyaghoz kristályos szervesetlen só (pl. ammónium-nitrát, kálium-perklorát) formájában keverik az oxigénhordozó anyagot, amelyet valamilyen kötőanyagba, pl. poliuretánba ágyaznak. [1]

Elterjedt szilárd hajtóanyagok a berillium-hidrid (üzemanyag), finom alumínium por (üzemanyag) és ammónium-perklorát (oxidálószer) keveréke gumyszerű anyagokkal (pl. polibutadién-akrilnitril-polimer (PBAN) vagy terminált hidroxil-polibutadién (HTPB) szilárd keverékké megkötve, melyek üzemanyagként is szolgálnak. Régebben préselt fekete lőport is használtak, ezt ma már csak kisebb rakétákban alkalmazzák. [1]

A hajtóművek főbb jellemzői:

- tolóerő;
- fajlagos tolóerő;
- tömeg (a hajtómű fajlagos tömege a hajtóanyag komponensekkel feltöltött hajtóműszerkezet (hajtóház + táprendszer) tömegének és az előállított tolóerőnek a hányadosa);
- méret.

## ÜZEMBIZTONSÁG

Az üzembiztonság rendkívül fontos, de nehezen mérhető jellemző. Megmutatja, hogy milyen a meghibásodás nélküli működés valószínűsége. [2]

A paraméterek egymástól való függése nagyban befolyásolja a hajtómű teljesítményét (pl. a tolóerő a hajtóanyag-fogyasztás vagy a tüzelőtér nyomás függvényében), valamint a paraméterek jelleggörbéje (pl. a hajtómű magassági jelleggörbéje, vagyis a tolóerő változása a repülési magasság függvényében) is. [2]

### A hőátadás biztonsági elemzésének fontossága a rakétahajtóművekben

A szilárd üzemanyagú rakétahajtóművekben az égéstermékkel igen magas hőmérsékleten közölt hőmennyiség és a fűvócsőben fellépő nagysebességű áramlás komoly hőterhelési problémákat okoz, amely megoldása nem könnyű feladat. Ha ezeket a hőátadási kérdéseket nem kezeljük kellő gondossággal, a következmények súlyosak lehetnek. A legkisebb probléma ha csak teljesítménycsökkenés lép fel, például a divergens törése miatt, de a helytelen méretezés következtében a hajtómű felrobbanása is bekövetkezhet. [2]

A rakétahajtóművekben a hőátadás alapján véve különbözik attól, amivel a szokásos kalorikus gépeknél, a motoroknál és készülékeknél, kazánoknál, kemencéknél, stb. találkozunk.

Úgy gondolom, hogy biztonságtechnikai szempontból az alábbi tényezők tisztázása (figyelembe vétele) nagyban hozzájárul a rakétahajtóművek üzembiztos és kifogástalan működéséhez:

1. A rakétahajtómű maximális működési ideje az **égésidő**, a teljes hajtóanyag-mennyiség kiégéséhez szükséges idő. Az égőteret, biztonsági okokból, ennél hosszabb üzemidőre tervezik. Ez a **hajtómű-üzemidő**, ami az égéssel történő működés meghibásodás nélküli teljes időtartama.
2. A rakétahajtóművekben az egy térfogategységre eső **energia felszabadítás** jóval nagyobb, mint egy jó minőségű hagyományos gőzkazánban. A felszabadított energia egy jól tervezett gázturbina égőkamrájában 3-4 szeresre a hagyományos gőzkazánhoz képest. A szilárd üzemanyagú rakétahajtóműben ugyanezen energia a gázturbina égőkamrájához képest 4-5 szerese. Ezért is fontos az üzembiztonság szempontjából.
3. A **hőátadás sebessége** a felületegységen másodpercenként átáramló hőmennyiség, amit hőfluxusnak is neveznek.
4. Az **égési hőmérséklet** a rakétahajtómű égőterének végén az égéstermék gázok közepes hőmérséklete. Szilárd hajtóművekben jóval magasabb ez az érték, mint a szokásos ka-

zánokban, értéke rendszerint 2500 és 3000 K között van (A folyékony hajtóanyagú rakétahajtóművekben a falak mentén a hőmérséklet kisebb, mint az égőtér közepén).

5. Az **égési sebesség** (amely a szilárd rakétahajtóanyag esetében az időegység alatt az égés következtében bekövetkezett méretcsökkenése) vizsgálatánál nagyon fontos biztonsági szempont az, hogy az égéstermékek nagy áramlási sebessége a fűvócsővekben intenzív hőkonvekciót hoz magával.
6. A **hajtómű-üzemmód** a rakétahajtómű üzemének jellemzője, amely a tolóerő változás értékével és sebességével, a hajtóanyag fogyasztással és más paraméterekkel írható le. Átmeneti (indítás, leállítás, tolóerő-változtatás, hajtóanyag viszonyszám változtatás) és állandósult hajtómű-üzemmódot különböztetnek meg.
7. A **hajtómű-teljesítmény** a hordozórakéta pillanatnyi sebességének és a működő fokozat hajtómű tolóerejének szorzata. Nem jellemzi sem a hordozórakéta méretét, sem pedig a szerkezet korszerűségét, hiszen az indítás pillanatában, amikor a sebesség nulla, bármely rakéta hajtómű-teljesítménye is nulla. Technikai szempontból érdektelen adat. [1][2]

Fontos megemlíteni a hővezetéssel kapcsolatban, hogy a hajtómű egyes részei közvetlen érintkezésben vannak a forró égéstermékekkel: az égőkamra falát képező hőszigetelő bélésbe és a fűvócső falába a hőkonvekció és sugárzás útján jut be és ott hővezetéssel terjed tovább. [2]

## A rakétahajtómű tartályok típusainak üzembiztonsági elemzése

### *Szerkezeti anyagok*

A rakétahajtómű külső burkolatának rendszerint viszonylag magas nyomásokat kell kibírnia (5-10 MPa) nagyobb deformációk nélkül, hogy a nyomás alá helyezésnél minimális feszültségek terheljék. Tehát a rendelkezésre álló legjobb teljesítményű szerkezeti anyagok alkalmazása elengedhetetlen, valamint az is, hogy a méretezésnél viszonylag kis biztonsági tényezővel dolgozzanak (a repülőiparban szokásos értékekkel). [2]

A rakétahajtómű tartályok építéséhez leggyakrabban használnak anyagokat (fémek és szerkezeti, valamint kompozit anyagok családjába tartozók):

- alumínium ötvözet (AZ5GU);
- nemes acél;
- vascojet 1000 (40 CDV 20);
- maraging acél (Z2 NKD 18);
- titán ötvözet (TA 6 V);
- üveg fonal + epoxid gyanta<sup>3</sup>;
- karbon fonal + epoxid gyanta;
- grafit fonal + epoxid gyanta;
- kevlar PRD 49 poliamid + epoxid gyanta. [2]

### *Fémtartályok*

A rakétahajtóművekben alkalmazott fémtartályok rendszerint egy hengeres részből és két fedélből állnak. A mellső fedélen központi kör alakú nyílás szolgál a gyújtószerkezet beszerelésé-

<sup>3</sup> Párhuzamos szálakkal erősített kompozit anyag

sére, míg a hátsó fedélen ennél jóval nagyobb átmérőjű nyílásra van szükség a fűvócső felerősítésére. A fémtartályok vékony héjszerkezetek, gyűrűszerű erősítésekkel, peremekkel a fedélnyílások mentén és a hengeres rész és a fedelek csatlakozásainál. A legegyszerűbb előállítási eljárás szerint a hengeres részt fémlemezről kerekítik és egy alkotó mentén hegesztik. A két tartályfedelelet dombornyomással, majd ezt követő forgácsoló megmunkálással gyártják és kerület menti hegesztéssel kötik a hengerhez. [2]

A megoldást megvizsgálva megállapíthatjuk, hogy biztonságtechnikai szempontból nem kielégítő, mivel a henger alkotója mentén futó hegesztővarratot a belső nyomás hatására fellépő kerületi feszültségek terhelik. Ennek elkerülésére alkalmazzák az úgynevezett „folyással járó nyomást”. Ezen technológia segítségével, a megfelelő anyagból kovácsolt vastag falú rövid hengert hossz tengelye körül forgatják és igen nagy erővel, több lépésben, nyomószerszámmal a hajtóműben kívánt hosszúságúra levékonyítják, valósággal elkenik. A főlény az, hogy eltűnt a hosszirányú hegesztővarrat, ezen kívül nincs anyagvesztés. [3]

### *Tekercselt kompozit tartályok*

A szilárd hajtóanyagú rakétahajtóművek égőtér burkolatát gyakran készítenek kompozit anyagból tekercseléssel. Az üres égőtér belső alakjának megfelelő forgástere (más néven: mag), a töltőanyagnak használt, műgyantával impregnált, igen vékony (5-10  $\mu\text{m}$  vastag) fonalakból alkotott köteget raknak le több rétegben, forgás közben, meghatározott pálya szerint. A fonalköteg pálya és a mag mediángörbéje által bezárt szöveget tekercselési szögnek nevezzük. Megválasztásával biztosítani lehet, hogy valamennyi fonalat egyenlő húzófeszültség terhelje, amely üzembiztonság szempontjából fontos és elengedhetetlen feladat. [3]

## SZERKEZETI ANYAGOK ÉS GYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK BIZTONSÁGI VIZSGÁLATA

A rakétahajtómű fűvócső szerkezeti anyagainak egyaránt ki kell elégíteniük a szilárdsági és az aerodinamikai követelményeket. Megállapítható, hogy a nagyon intenzív hőcserélődés következtében a belső fal hőmérséklete rendkívül gyorsan emelkedik és a meleg hővezetéssel az egész fűvócsőbe szétáramlik. A szokásos szerkezeti anyagok szilárdsági tulajdonsága ezeken a hőmérsékleteken leromlanának, ezért a szigeteléssel a hő terjedését meg kell gátolni.

Ezen kívül, a belső fal anyagát az égéstermékek áramlása miatt fellépő termokémiai és termomechanikai hatások is igénybe veszik. A fűvócsővel szemben támasztott biztonsági követelmény az, hogy az erózió a lehető legcsekélyebb legyen. [4]

A fűvócsővekben háromféle típusú anyagot használnak:

- szilárdságot biztosító szerkezeti anyagokat (fémek, kompozit anyagok);
- hőszigetelőket (kemény polimer kompozitok);
- hőellenálló anyagokat (volfrám, grafit, pirolitikus grafit, karbon-karbon). [4]

A fűvócső belső falanyagának kiválasztásánál, az adott részeken, ahol a hőfluxus a legerősebb, a következő szempontok vezetnek:

- az égéstermékek tartályhőmérséklete gyakran eléri a 3400 K-ot;
- az égéstermékek redukáló hatásúak [4].

Néhány évtizeddel ezelőtt csupán két falanyag állt rendelkezésre: a volfrám és a polikristályos grafit<sup>4</sup>. Ezeket használták a fűvócső torokban. A volfrám kiváló hőálló fém, jól bírta a termikus sokkot és az erózió csaknem nulla volt (3400 K-ig), de rendkívül magas fajlagos tömege szükségszerűen korlátozta alkalmazási lehetőségeit. [4]

Itt kell megemlíteni a pirolitikus grafitot, amelyet a 70-es évek táján gyakran használtak torokbetétnek. Egy fal mentén, amelyet 2500 K-ra melegítenek, metán gázt áramoltatnak. Ezen a hőmérsékleten a szénhidrogén felbomlik (krakkol) és a falon karbon rakódik le. A fenti eljárás ismétlésével a rétegvastagság növekszik, és ezt addig folytatják, amíg néhány milliméter vastagságú lapot nem kapnak. [4]

Végül megjegyzendő, hogy a pirolitikus grafit nyíróigénybevételnek nem képes ellenállni, tehát az üzembiztonsági szempontokat nem elégíti ki, mivel a legcsekélyebb nyírás az anyag rétegekre bomlását okozza. [4]

Mivel a fentebb említett szerkezeti anyagok nem voltak kielégítőek, a hajtómű gyárak több-éves kutató munka után újabb anyagokat fejlesztettek ki, a karbon-karbon anyagokat. Ezek kompozit anyagok, amelyeknek a vázát karbon vagy grafit fonalak alkotják és a váz üregeibe bevezetett töltőanyag is karbon. A vázak előállítása többféle eljárással történhet. [4]

## TOLÓERŐ LEÁLLÍTÓ BERENDEZÉSEK

Ha a rakéta által szállított terhet nagy pontossággal akarják ballisztikus pályára helyezni, szükséges feltétel, hogy a rakéta, rendszerint utolsó fokozatának tolóereje igen rövid idő alatt leálljon. Ezt az igen fontos biztonsági feladatot a tolóerő leállító berendezéssel (TLB) érik el, amely a mellső tartályfedélen megfelelő számú és átmérőjű nyílást létesítve a tolóerő inverzióját idézi elő. [5]

A nyílásokat lezáró fedelek pirotechnikai reteszekkel vannak ellátva. A hajtómű propergoltömbjét úgy alakították ki, hogy a tolóerő inverzió pillanatában az égőkamra gázai a nyílásokon ki tudjanak áramlani, vagyis a zárófedél belső oldalát ne takarja propergol. Az adott pillanatban a pirotechnikai mechanizmus kiszabadítja a csillag alakú reteszeket és az égőkamranyomás hatására a szabaddá vált fedelek kirepülnek. A nyitás után az égőkamra nyomás lecsökken és egy második üzemmódban stabilizálódik. Ennek következtében a fékezőerő is csökken, de elegendő, hogy a ballisztikus pályán tovább mozgó terhet a rakétafokozattól még jobban elválassza. Az átváltás a két üzemmód között csupán néhány tizedmásodperc. [5]

### FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Rakétahajtómű, e-dok. url:<http://www.vilaglex.hu/Lexikon/Html/RakeHajt.htm> (letöltési idő: 2012-04-04. 10:13)
- [2] BOISSON J – La propulsion par fusée Tome 1 et 2. ENSTA, Paris 1972.
- [3] DARDARE J. – MERIGUET J. – VAILHE L. Réacteurs – Fusées Tome 1 et 2. ENSTA, Toulouse, 1974.
- [4] DARMOIS J. Propulsion 1ère partie: Poudres propulsives; 2ème partie: Technologie des propulseurs
- [5] ENSTA, Paris 1972.
- [6] DAVENAS A. et al. – Technologie des propergols solides. Masson, Paris, 1989.

<sup>4</sup> A polikristályos grafit mesterséges termék, nagy tisztaságú kőolaj, kokszipor és kátrány keverékéből állítják elő.