

Stonier Roger A.

A STEALTH TECHNOLOGIA KIDOLGOZÁSA A MÁSODIK VILÁGHÁBORUTÓL AZ ÖBÖL-HÁBORÚIG

Fordítás a "SAMPLE JOURNAL" 1991, 27. N^o 5 p 9-18.
megjelent cikke alapján

Fordító: Körmendi Géza mk. alezredes

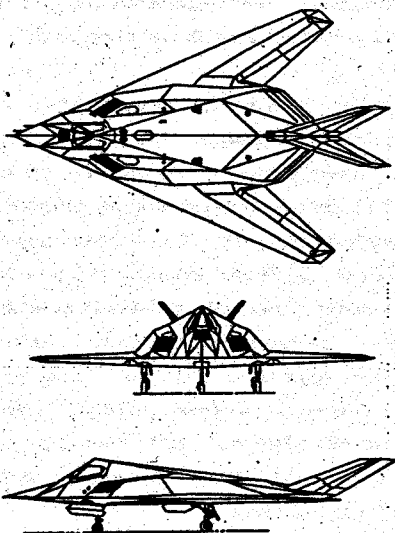
Az alábbiakban tárgyalt Stealth-technológiát az alacsony felderíthetőségű F-117A vadászrepülőgép és a B-2 bombázó repülőgép harci túlélőképességének fokozására dolgozták ki. A közölt anyagok, terv-koncepciók és új komplex technológiák e cél megvalósítása érdekében születtek.

Az F-117A volt ebben a kategóriában az USA Légierő első harcászati vadászrepülőgépe, melyről publikáció és képanyag 1990-ben jelent meg először. Ebben az időben láttak napvilágot az első közlemények a Northrop szupertitkos B-2-es csupaszárny bombázógépéről is. E katonai gépekbe integrálták az új technológiákat, egyebek között a kompozit anyagok széleskörű felhasználását, melyek felderíthetősége a rádiólokátorok frekvenciatartományában, optikai, akusztikus és infravörös módszerekkel egyaránt a kívánt alacsony szinten tartható. Az új technológiák eredményeként - melyek szálerősítésű kompozitokat és műanyagokat alkalmaznak - a repülőgépek lo-kátorképe olyanná vált, hogy felderíthetőségük a közvetlen megjelenésükig igen nehéz.

Az F-117A stealth vadászrepülőgép

E szupertitkos vadászgép létrehozása 1978 decemberében kezdődött. Első repülését 1981-ben hajtotta végre, míg az első fotót csak 1990-ben tették közzé róla. Az alkalmazott technológia eredményeként a gép - más vadászrepülőkhöz vi-

szonyítva - nagy magasságban, észrevétlenül, mélyen berepülhet az ellenség területe fölé. Ilyenkor akár meredeken emelkedhet is, ami a cél pontosabb meghatározását teszi lehetővé. Az [1] forrásmunka alapján az F-117A legfontosabb adatai: szárnyfesztávolság 13,2 m, törzs magassága 2 m, a szárny nyílazási szöge 87° , a repülőgép üres tömege 13600 kg, maximális felszálló tömeg 23800 kg, a fegyverzet 2x900 kg-os bombából áll, a szárny felületi terhelése 0,379 MPa, két db kétáramú General Electric gyártmányú, utánégető nélküli hajtóművének tolóereje 54,4 kN, sebessége valamivel a hangsebesség alatti, a hajtómű tolóerő repülőgép súly viszonya 0,45.



1. ábra

Az utánégetés nélküli hajtóművek alkalmazását az infravörös kisugárzás és a zajszint csökkentése indokolja. A szárny fölött elhelyezett hajtómű-szívócsatorna belépő keresztmetszetében rádióhullámokat elnyelő, kompozit anyagból

készült négyzetláncokból kialakított védőernyő megakadályozza az infravörös kisugárzást.

Az F-117A sárkányának - mely főként alumíniumból és csak kisebb arányban kompozitból készült - vázlatos háromnézeti rajza az 1. ábrán látható.

Az alacsony rádióhullám-visszaverő képesség alapvetően a sárkány síkfelületekből kialakított formájának köszönhető. Amikor míg az F-117A-t tervezték, hiányzott az analitikus modell, illetve a módszer az aerodinamikailag áramvonalas test visszatükrözési és (hullám-)törési jellemzőinek meghatározásához. A rádiólokátor hullámok eltérítése az előbbiekre említett, a függőlegetől adott szöggel elfordított síklapokkal megoldható, melyek azokat így felfelé vagy lefelé verik vissza. A sárkányelemek éles (fogazott) kialakítása rontja ugyan az aerodinamikai jellemzőket, viszont a ráeső sugarak visszaverődési és diffrakációs jellemzői is rosszabbak lesznek. A törzs vékony kilépőelű hátsó szakasza a szárnyal fecskeformát alkot, ezzel is a sugárzás visszaverőképességét csökkenve. Ugyanez vonatkozik a bombatér ajtók mellő részére, a hajtómű szerelőnyílások fedelére és a homloküvegezés keretére. A sárkányborítás külső felülete rádióhullámokat elnyelő anyagból készült. Annak érdekében, hogy az elektromos vezetőképesség biztosított legyen a homloküvegezés és a fülketető között, valamint a rádióhullám visszaverőképességet is csökkentsék, az üvegezést vékony aranyfűsttel vonták be.

Az egyszemélyes vadászrepülőgépnél automatikus, digitális kormányvezérlő rendszere van, mivel az alacsony felderíthetőségi szint elérése feltételezi a statikus instabilitást is. A szubszonikus gép szárnynyílzási szöge olyan nagy, mint ami egyébként a szuperszonikus repülőgépeket jellemzi. A hajtómű tolóereje és az aerodinamikai jóságai jellemzők a hangsebesség feletti repülést is lehetővé tennék,

azonban néhány szerkezeti anyag nem képes elviselni az ezen repülési üzemmódhoz tartozó magas hőmérsékletet. A függőleges vezérsíkot viszont olyan szénszálerősítéssel kompozitanyagból alakították ki, amely ellenáll a szuperszónikus sebességeken jelentkező hőterhelésnek.

Az USA légierő vezetése szerint az F-117A alkalmas csapásmérésre a rádiólokációs eszközök támogatásának felhasználása nélkül is.

Az első harci repülésre 1989 decemberében, a panamai beavatkozás idején került sor, ahol ez gyakorlatilag semmilyen kockázattal nem járt. A tényleges harci bevetésben való részvételének helye 1991-ben a Perzsa-öbölnél vívott háborúban volt. Az F-117A-k hatékonyságát kellően bizonyítja, hogy iraki védett célpontok ellen vetették be és a végrehajtott 1000 repülés során egyetlen egy sem sérült meg.

A B-2-es bombázórepülőgép

Ezt a 2. ábrán látható (függőleges vezérsík nélküli, csupaszárny) repülőgépet a NORTHROP cég fejlesztette ki. A függőleges irányfelületek funkcióját a szárnykilépőelen el-



2. ábra

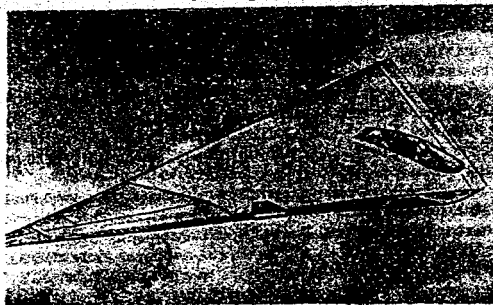
helyezett, mozgatható kormánylapok látják el. A fedélzeti

számítógépen keresztül történő gyors vezérlésükkel biztosíthatók az instabil sárkány kivánt aerodinamikai jellemzői. A tervezése a legteljesebb titoktartás mellett a '70-es években kezdődött. A program néhány elemét a '80-as években ugyan közzétették, de külső képe csak 1988-ban jelent meg, első repülését pedig 1989-ben hajtotta végre.

A B-2 szerkezeti elemei között széles körben alkalmaztak szénszálerősítésű kompozitokat, egyebek között ilyenekkel van bevonva a keszon-kialakítású szárnya is. A törzs farokrész középső és a szárny külső szekciói a Boeing-cég technológiája alapján készültek.

A szárny hátsó része - a hajtómű forró gázainak kifúvási zónája - magas hőterhelésnek ellenálló "szén-szén" speciális kompozitanyagból lett kialakítva. A hajtómű fűvécsovét olyanra tervezték, hogy szétszórva a hőt csökkentse a földfelszínről is felderíthető infravörös kisugárzást. A szárnyfelületen (és részben a belépőleken) olyan kompozitanyagokat, illetve rétegeket használtak, amelyek elnyelik a rádiófrekvenciás sugárzást.

Az USA haditengerészeti légierője számára tervezett Avenger elnevezésű csatarepülőgép (3. ábra) a B-2-nél is

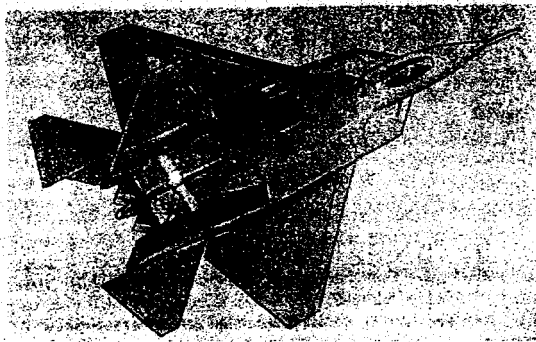


3. ábra

jobb "lopakodó" jellemzőkkel rendelkezik. A technikai nehéz-

ségek és a pénzügyi korlátozások következtében azonban ezt a fejlesztési programot törölték.

A 4. ábrán az ugyancsak stealth-technológiával épült F-22-es taktikai vadászpilóta repülőgép látható.



4. ábra

Az F-22-es könnyű sárkánya szénszál erősítésű kompozitokból, illetve ahol lehetséges termoplasztikus anyagokból épül fel. Az F-22 utánégetés nélkül képes hangsebesség felett repülni, ami elengedhetetlen az alacsony felderíthetőségi szint biztosítására.

A stealth technológia

E fejezet áttekintést ad azokról az alacsony felderíthetőséget biztosító technológiai lehetőségekről, melyek speciális szerkezeti kialakítással, illetve kompozitanyagok felhasználásával valósíthatók meg. A korszerű rádiólokátorok általában az $(1-18) \cdot 10^6$ Hz frekvenciatartományban dolgoznak. Így a repülőgép szerkezeti elemeit, illetve az alkalmazott speciális anyagot a frekvenciatartományba tartozó kisugárzás elnyelésére kell optimalizálni. A lokátor-technika fejlődése és az üzemi frekvenciatartomány kiszélesedése szükségessé

teszi az elnyelési tartomány kibővítését is. Ennek eredményeként az utóbbi években gyors fejlődésnek indult a rádióhullámokat elnyelő anyagok technológiája.

A repülőgép rádiólokátor hullámokat átbocsájtó, illetve a kompozitok visszatükröző képessége anyaguk fizikai jellemzőitől - mindenekelőtt a dielektromos (ϵ) és mágneses (μ) permeabilitásuktól - és az elektromos karakterisztikáiktól függ (utóbbihoz értve az R-L hullámok elhajlási szögét is). Ennek megfelelően az R-L hullámokat elnyelő anyagok kétfélék, dielektromosak és mágnesesek lehetnek. A dielektromos anyagok elnyelőképesége a kompozitok ohmikus energiavesztességétől függ. Dielektrikumok lehetnek például szén-, grafit- és fémporok.

További fontos jellemzők a dielektromos állandó és a veszteség szögének tangense, amely az alkalmazott kompozit szálának és mátrixának anyagától függ. A mágneses kompozitok elnyelőképesége a mágneses hiszterézis fajtájától függ, ami akkor figyelhető meg, amikor a mátrixba kárbid vagy vas-ferrit anyagot kevernek.

A mikrohullámok elnyelésének elvét a [2] forrásmunka értelmezi. A lokátor kisugárzása először szabad térben történik, amelynek impedanciája (teljes ellenállása) z_0 , majd hullám beesik a z_1 impedanciájú dielektromos vagy mágneses anyag felületére, ahonnan a hullámok egy része R visszatükrözési együtthatóval visszaverődik.

$$R = \frac{1 - \frac{z_1}{z_0}}{1 + \frac{z_1}{z_0}}$$

ahol:

$$z_0 = \sqrt{\frac{u_0}{e_0}} \quad \text{és} \quad z_1 = \sqrt{\frac{u_1}{e_1}}$$

A visszatrükröződés megszűnésének ($R=0$) feltétele $z_0 = z_1$, ami akkor következik be, ha

$$\frac{u_1}{e_1} = \frac{u_0}{e_0}$$

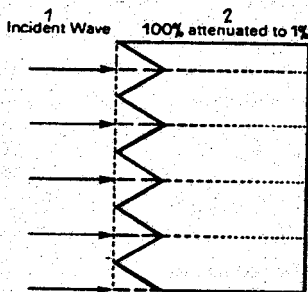
vagyis azon a helyen, ahol $u_1 = e_1$.

Nagyfrekvenciák esetén azonban u_1 értéke nem érheti e_1 -ét, ezért speciális anyagot, illetve szerkezeti megoldást kell alkalmazni. Az anyagok dielektromos és mágneses sajátosságainak, vastagságának, veszteségeinek, impedanciájának, belső optikai tulajdonságainak szabályozásával optimalizálható a rádióhullám elnyelő képesség egy, több, vagy valamennyi frekvenciatartományban.

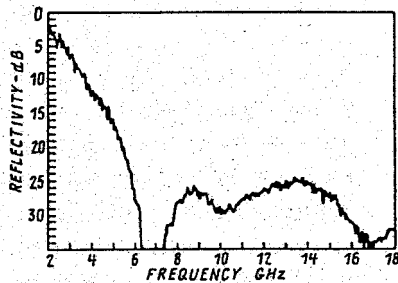
A mikrohullámok dielektromos elnyelési sajátosságai az anyag vastagságának (mélységének) függvényében változnak. (Ezért gradiens-elnyelőknek is nevezik őket!) Ez az anyag elektromos sajátosságainak megváltoztatásával, átöltések megosztásával érhető el. Ilyen anyagok lehetnek a merev és rugalmas polimerek, fenoplasztok. A dielektromos elnyelő felső rétegük impedanciája megközelíti a szabadterét. Ennek hatására a felületről történő visszaverődés minimumra csökken, a beeső jelek nagy része behatol az elnyelő anyagokba, ahol szétszóródik (elnyelődik). A veszteségek az anyag vastagságával exponenciálisan csökkenő impedancia hatására jönnek létre. Az 5. ábrán az R-L hullámok energiacsökkenésének vázlatos rajza látható széles spektrumban elnyelő gradiens-dielektrikum esetében. (Leírása a [2] forrásmunkában).

Alkalmazznak merev, könnyű fenoplasztot is, mikrokerámia

réteggel. A raszteres mintázatú bevonattal ellátott fenoplaszt - mint gradiens-elnyelő - visszatükrözési együtthatója (dB) a frekvencia (GHz) függvényében széles tartományban alacsony, amint az a 6. ábrán látható. Ilyen 1 m^2 felületű, $1,9 \text{ cm}$ vastagságú anyag tömege $0,915 \text{ kg}$.



1-belső hullám; 2-a belső energia 100 %-a 1 %-ra gyengül
5. ábra



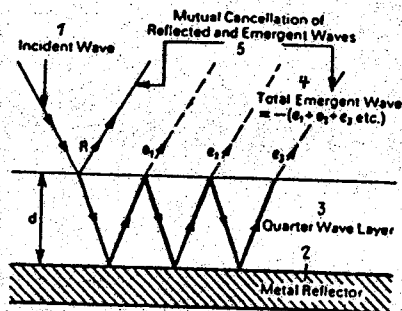
6. ábra

Amikor a jel teljesítményének 99 %-a elnyelődik, visszatükrözési együtthatója $20 \text{ dB-re}/\lg(99+1) / 1$ csökken. A legkisebb közepes 98,9 %-os elnyelési értéknek 15 dB felel meg.

A mágneses mikrohullám-elnyelők olyan elasztomer poli-merekből (mint például poliizopren, neopren, kaucsuk nitril, szilícium, uretán, kaucsuk-fluorid) készülnek, amelyekbe töltőanyagként ferritet vagy más mágnesezhető anyagot juttatnak [3]. Az anyag kívánt mágneses tulajdonságai és vastagsága szabályozására olyan polimereket alkalmaznak töltőanyagként, amelyekkel biztosítható a mágneses permeabilitás magas értéke. A mágneses elnyelő anyagok rendszerint vastagabbak a dielektromosaknál, ugyanakkor hatékonyabbak is. Állandó vagy változó, $0,5-1,25 \text{ mm}$ közötti vastagságúra, a szerkezeti elem által megkívánt formájúra alakítják ki. Az

egy vagy két frekvencia elnyelésére létrehozott anyagok 20-25 dB-re csökkentik a jel értékét, ami (99 és 99,7 %-os energiaelnyelésnek felel meg). A széles frekvenciatartományban működő anyagok a belső jelet 12 dB-re gyengítik (95 %-os elnyelés).

Az olyan ismert rezonáns-elnyelőt, mint például a Salisbury Screen (SS) már a '40-es években felfedezték, de csak sok évvel később szabadalmaztatták [4]. Ebben a szendvics szerkezetben a visszaturózó felülettől a belső hullámhossz egynegyedének ($\lambda/4$) megfelelő távolságra vékony ellenállás-réteget (ekrant) helyeznek el. Általában az ekran felületi ellenállásának impedanciája megközelíti a külső tér impedanciáját, ezáltal minimális lesz az elektromágneses anyagról a visszaverődés. Hasonló berendezést szabadalmaztalt McMillan is 1959-ben [5]. A 7. ábra az SS működési elvét mutatja be [2].



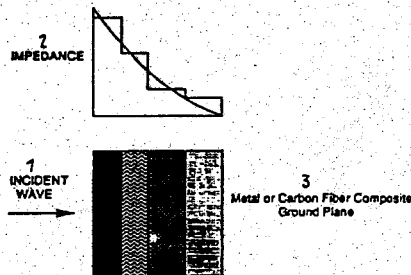
1-belső hullám; 2-fémvisszaverő felület; 3- $\lambda/4$ vastagságú réteg; 4-teljesen visszaverődő hullám; 5-a visszaverődő hullámok kölcsönös elnyelődése

7. ábra

Az ekranra érő sugárzás egy része közvetlenül visszaverődik (R), további része a felületen megtörve a fémrétegről tükröződik vissza. Ez utóbbi hullámnak egy része az ekranon áthaladva az kilép onnan (e_1), további része visszaverődik a

fémfelületre és onnan újra visszatükröződik, és a folyamat így ismétlődik tovább. Mivel az ekran és a fémfelület távolsága $\lambda/4$ az e_1 hullám 180° -os fáziskésésbe kerül az R hullámhoz képest, interferálnak és kioltják egymást. Ez az effektus azonos azzal, ami az optikai lencse visszaverődésgátló felületén történik. Az SS rezonáns-elnyelő a beeső jelet szűk frekvenciatartományban a 30 dB-re csökkenti (99,9 %-os elnyelés) [2]. E megoldás hátrányai, hogy az anyag nem hajlékony, meglehetősen vastag (különösen alacsony frekvenciák ellen alkalmazva), előállítási költségei viszont magasak.

E problémák részbeni kiküszöbölésére a kezdeti időszakban a Dallenbach által javasolt (CD) réteget alkalmazták. Ez egyetlen homogén lap, amely lehet akár dielektrikum, akár mágneses, szendvics töltőanyagként pedig hajlékony polimert is használhatnak. A réteg dielektromos vagy mágneses permeabilitásának növelése megnöveli a visszatükrözési mutatót ($\sqrt{\mu \cdot \epsilon}$) úgy, hogy az SS-hez képest jelentősen csökken a vastagság is ($1/\sqrt{\mu \cdot \epsilon}$ -vel arányosan). A CD homlokfelületét érő



1-belső rádiólokátor hullám; 2-impedancia; 3-fém- vagy szén-szálerősítésű kompozit-visszatükröző

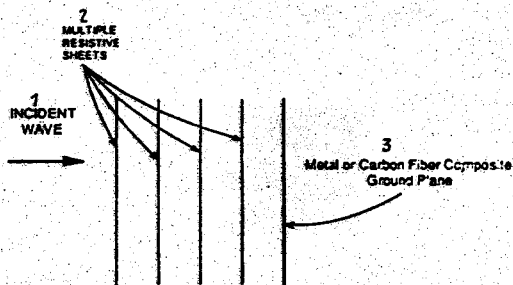
8. ábra

energia egy része a fém vagy széntartalmú kompozit visszatükröző felület felé haladva is elnyelődik. A kiegészítő el-

nyelés lényege (ua. mint előző ford.!), hogy a visszatükröző felületről visszaverődő hullámrész a CD-n keresztül haladva hátulról eléri az ekran felületet, ekkorra 180° -os fáziskészsébe kerül az ugyanezen pontról kívülről a szabadba visszaverődő hullámrészhez képest, aminek eredményeként nem lép ki energia a rendszerből. A CD vastagsága negyede lehet az SS-ének. Több CD-rétegből kialakított gradiens-elnyelő látható a 8. ábrán.

Minden réteg vezetőképessége különböző, az impedanciájuk a külsőtől a belső visszatükröző felületig exponenciálisan csökken maximálisról a minimális értékig. Az elektromos karakterisztikák rétegenkénti változása a töltés mennyiség bevitele által úgy van optimalizálva, hogy elérjék a kívánt elnyelési értéket. Amennyiben a töltéskonzentráció nagy, az elektromos vezetőképesség is megnő, ami hatékony elnyelést biztosít az anyag belsejében.

Az az elnyelő, amelyet Jauman [6] munkájában mutat be a 9. ábrán látható.



1-belső hullám; 2-ellenállás rétegek; 3-fém vagy szén-szál-erősítésű kompozit visszatükröző lap

9. ábra

A rétegeket $\lambda/4$ vastagságú méhsejt szerkezetű töltőanyaggal különböztik el egymástól.

Mint az a sikeres raszteres elnyelő PD-n megfigyelhető, olyan többrétegű dielektromos bevonattal látták el, amelyet fémek vagy szilícium (fémkerámia) gőzeinek kicsapásával állítottak elő, felületére négyzethálós mintázatot marattak, ami hatásosan gyengíti a rádiólokációs sugarakat. Az ilyen raszteres bevonat hasonló a dikroikus antennák felületeihez [7-10], amelyek a hullámhossztól függően egy vagy több frekvenciát visszavernek, míg a többit átbocsájtják.

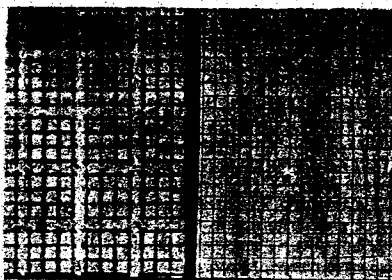
A raszteres bevonatoknak induktivitásuk és kapacitásuk van, értékük a hálós mintázat nagyságával, geometriai méreteivel, a mintázott alapelemek periodicitásával, a bevonat elektromos sajátosságaival (dielektromos állandó és a veszteség szögének tangense) szabályozható. A raszteres mintázat mérete - amelyet rendszerint meghatározott frekvenciához terveznek - kisebb, mint a hullámhossz. Anyagául általában poliimid bevonatot alkalmaznak, mivel az a következő előnyöket biztosítja:

- könnyű rá fémtartalmú bevonatot felvinni, illetve a raszter-mintázatot kimaratni;
- kötőanyagként - jó, termikus paraméterekkel és dielektromos sajátosságokkal bíró - epoxi gyanta is alkalmazható;
- vastagsága kicsi $(8,5 + 127) \cdot 10^{-6}$ m.

Az elnyelő bonyolult raszteres mintázatai a 10. ábrán láthatók.

A bevonaton nagyszámú - egyébként egy-egy szűk sáv átbocsájtására alkalmas - négyzetrács kombinációjával és egy-

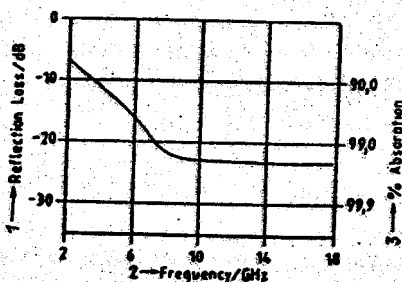
mástól $\lambda/4$ távolságra való elhelyezésével széles spektrumban használható, vékony sugárzáselnyelő nyerhető. Minden réteg



10. ábra

különböző sajátosságokkal rendelkezik és elektromos jellemzői az elnyelő teljes vastagsága mentén változnak. A rétegek egymástól és a visszatükröző felülettől fenoplasztból vagy plasztikból készült, méhsejt szerkezetű töltőanyaggal vannak elválasztva.

A 11. ábrán egy széles spektrumban működő elnyelő tipikus méhsejt szerkezetű töltőanyagának paraméterváltozása látható. A töltőanyag vastagsága 16 mm, anyagsűrűsége 32 kg/m^3 , egyetlen méhsejt átmérője 6 mm.



1-visszaverődési veszteség (dB); 2-frekvencia (GHz); 3-az elnyelődés százaléka

11. ábra

A vékony ellenállás réteggel borított elektromágneses hullámelnyelő másik fajtája az úgynevezett R-Card. Ezt vékony (10^{-10} m nagyságrendű), vákumban fémekkel (arany, réz, nikkel vagy szilícium) töltött rétegekből alakítják ki. Az ilyen bevonatot vékony polimid rétegre vagy üvegszál erősítésű kompozitanyagra hordják fel. A R-Card típusú sugárzás elnyelő ellenállása a vastagság függvényében - a szerkezeti kialakításától függően - különbözőképpen változik (másod-, harmadfokú parabola, exponenciálisan, logaritmikusan).

FELHASZNALT IRODALOM

1. Annon, *Aviation Week & Space Technology* 132 (20), 106 (1980).
2. R.N. Johnson, "Radar-Absorbing Materials: A Passive Role in An Active Scenario", in *International Countermeasures Handbook*, 11th Edition, E.W. Communications, Palo Alto, CA.
3. Annon, *Aviation Week & Space Technology* 131 (12), 109 (1989).
4. W.W. Salisbury, "Absorbent Body for Electromagnetic Waves", U.S. Patent 2,599,944, (June 10, 1952), assigned to the Secretary of the Navy, Washington D.C.
5. E.B. McMillan, "Electromagnetic Wave Absorbing Dielectric Walls" U.S. Patent 2,875,435 (February 24, 1959), not assigned.
6. E.F. Knott, "Radar Cross Section", in *Aspects of Modern Radar*, E. Brookner Ed., Artech House, Norwood, MA, 1988, Chapter 8 p. 413. Good overview of subject.
7. R.A. Stonier, *SAMPE Nat'l Tech. Conf.*, 9, 504 (1977).
8. D. Bresciani, S. Contu, C. Bruno, D. Marzi, G. Tempesta, R. Stonier and G. Crone, "Development of A 1-m Dichroic Reflector for Ku/Ka Frequency Bands", *JINA*, 1988.
9. D. Bresciani and S. Contu, *Electromagnetics*, 5 (4), (1985).
10. C. Bruno, D. Marzi and R. Stonier, "Technological and Mechanical Activities on Frequency Selective Sub-Reflectors", *ESA Workshop on Antenna Technologies*, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, Nov. 1989, ESA Document esa WPP-12, Nov. 1989.

11. P.S. Bradshaw, *Proc. 10th Int'l European SAMPE Chapter Conf.*, Edited by S. Benson, et. al., Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1989, p. 187.
12. E.Y. Robinson, R.A. Stonier and L.C. Lofgren, *Proceedings of the Third ASTM Conference on Composite Materials: Testing and Design, ASTM STP 546, 1974*, p. 632.
13. B. Abt and H. Rieger, *SAMPE National Symposium*, 24, 848 (1981).
14. M.I. Skolnik, *IRE Trans.*, ANE-8 19 (1961).
15. J.W. Caspers, "Bistatic and Multistatic Radar", in *Radar Handbook*, M.I. Skolnik, Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1970, Chapter 36.
16. M.I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 2nd Edition, International Student Edition, McGraw-Hill Book Co., Singapore, 1981, p. 553.
17. A.A. Kolosov, et al, *Over-The-Horizon Radar*, Artech House, Norwood, MA, 1987. Translated from Russian by W.F. Barton.
18. Ref. 16, Chapter 14, "Other Radar Topics", p. 529.
19. M.R. Stiglitz and C. Blanchard, *Microwave Journal*, 33 (5), 32 (1990).
20. Aanon., *Aviation Week & Space Technology*, 131 (23), 38 (1990).