

Dr. Lukács László¹ - Szalay András² - Dr. Zádor István³

A REPÜLŐGÉPEK GYÁRTÁSÁNÁL ALKALMAZHATÓ KÉT- ÉS HÁROMRÉTEGŰ FÉMANYAGOK ELŐÁLLÍTÁSA ROBBANTÁSOS PLATTÍROZÁSSAL⁴

A villamos ipar, a járműgyártás, a reaktorteknika sokféle különleges, többkomponenses anyagot és alkatrészt alkalmaz, így két- vagy többrétegű plattírozott fémlemezeket, szalagokat, huzalokat illetve alkatrészeket. A plattírozás két vagy több különböző anyagú fémlemez egyesítését jelenti. A plattírozott lemezek egyesítik az alkotó fémek jellegzetességeit, ezáltal lehetőséget adnak a gazdaságos és célirányos alkatrésztervezésre. A plattírozási technológiák egyike a robbantásos plattírozás. A robbantásos plattírozás energiaforrása a robbanóanyag, „szerszáma” a detonáció kiváltásával létrehozott nagy energiatartalmú nyomáshullám. A publikáció ismerteti a robbantásos plattírozási technológia elvét és gyakorlatát, továbbá bemutat néhány repülőgép gyártási alkalmazást.

PRODUCTION OF TWO- OR THREELAYERS METALLIC MATERIALS APPLICABLE AT MANUFACTURING OF AEROPLANES BY EXPLOSIVE CLADDING

The electrical industry, the vehicle production, the nuclear technique use many special multicomponent materials, and component part as two-or more layer cladded plates, sheets, wires and component parts. Cladding is the name of the process serving for bonding two or more metal with different material quality. One of the known cladding techniques is the explosive cladding. Explosive cladding is a solid state process in which controlled explosive detonations force two or more metals together at high pressures, resulting a high quality metallurgical bond between the colliding surfaces. The paper reports the theory and practice of the explosive cladding furthermore a few applications in the aircraft industry.

BEVEZETÉS

A villamosipar, a járműgyártás, a reaktorteknika sokféle különleges, többkomponenses anyagot és alkatrészt alkalmaz. Különleges többkomponenses anyagokon az alábbiakat értjük:

- két- vagy többrétegű plattírozott fémlemezek, szalagok, huzalok illetve alkatrészek;
- porokból illetve granulátumokból készített fém(ötvözet)-kerámia összetételű kompozit rudak, huzalok illetve alakos alkatrészek.

A fenti anyagkombinációk előállítására alkalmazott technológiák egy csoportját alkotják az ún. „nagy energiasebességű megmunkálások”. Ezen megmunkálásokat nemzetközileg elfogadott rövidítéssel HERF eljárásoknak nevezzük (High Energy Rate Formings). A HERF eljárások két speciális területe az elektromágneses és a robbantásos fémmegmunkálás.

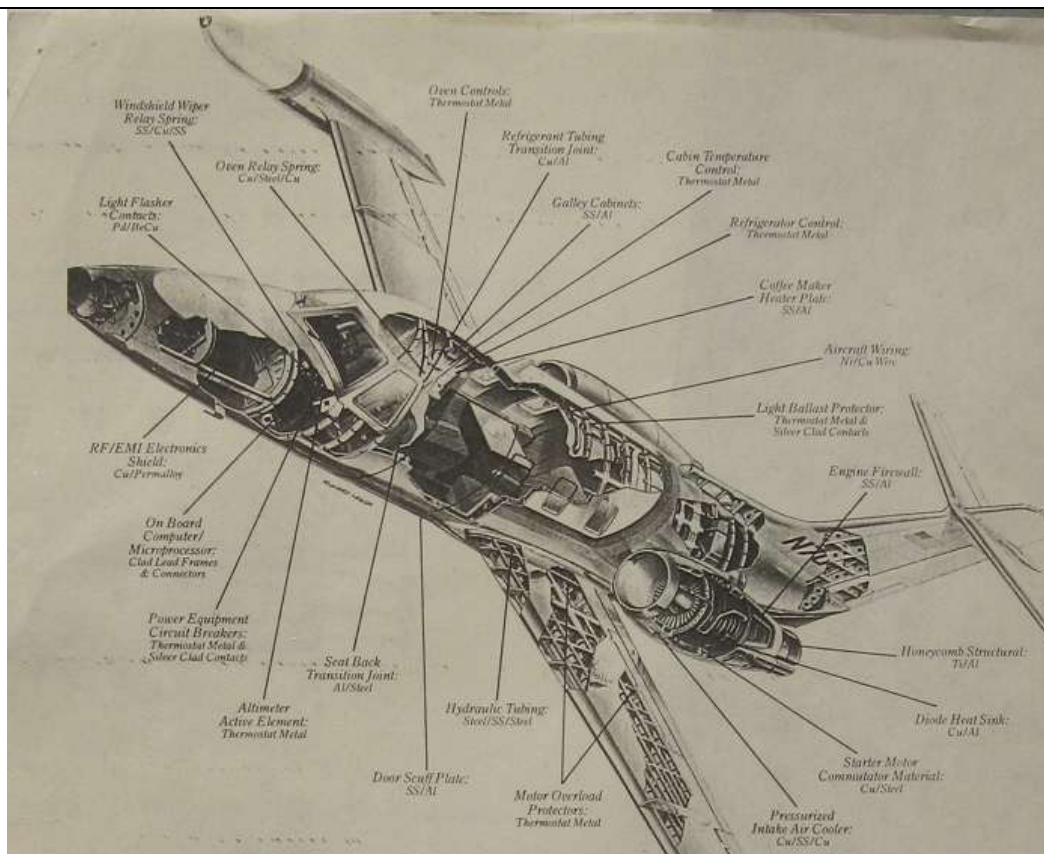
Mind a polgári mind a katonai repülés gépein sokféle két- és többkomponenses anyagot alkalmaznak.

¹ Nemzeti Közszolgálati Egyetem, lukacs.laszlo@uni-nke.hu

² S-Metalltech 98 Anyagtechnológiai Kutató-fejlesztő Kft, andras.szalay@smet.hu

³ S-Metalltech 98 Anyagtechnológiai Kutató-fejlesztő Kft, istvan.zador@smet.hu

⁴ Lektorálta: Dr. Kovács Zoltán okl. mk. őrnagy, egyetemi docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem



1. ábra Repülőgépen alkalmazott többkomponenses plattírozott anyagok

Az 1. ábrán feltüntetett többkomponenses anyagok két- és háromrétegű plattírozott fémek, melyek közül példaként az alábbiakat emeljük ki:

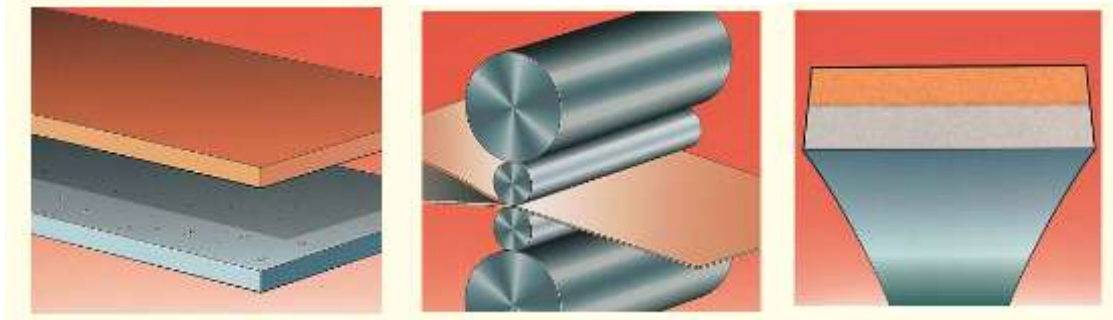
- motor túlterhelés védelem: termosztát fém (termo bimetál);
- hidraulika csövezés elemei: szénacél-rozsdamentes acél-szénacél;
- ajtó-tömítő lemez: rozsdamentes acél-alumínium;
- üléstámla csatlakozó rész: alumínium-szénacél;
- magasságmérő aktív eleme: termosztát fém (termo bimetál);
- villamos megszakító: termosztát fém és ezüsttel bevont érintkező;
- villamos árnyékolás: réz-permalloy;
- fényjelző kontaktus: palládium-bronz;
- kemence kioldó rugó: réz-acél-réz;
- hűtőrendszer csövezéshez csatlakozó idomok: réz-alumínium.

A jelen publikációban a többrétegű fémek előállítási technológiáit mutatjuk be, ezek közül részletesen a robbantásos plattírozás elvét és gyakorlatát.

PLATTÍROZÁS

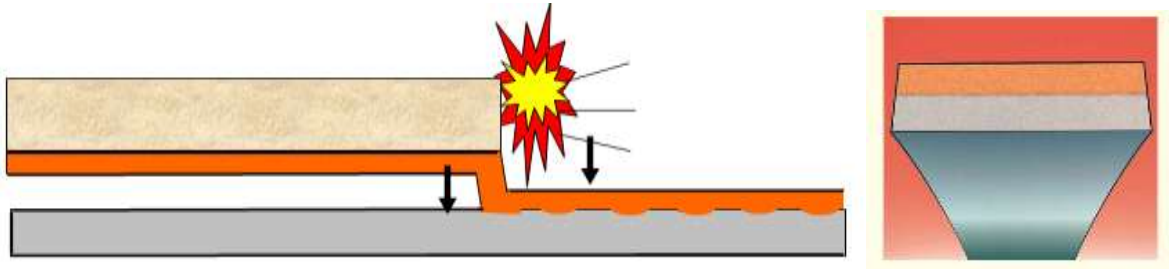
A plattírozás két vagy több különböző anyagú fémlemez egyesítését jelenti, pl. réz-alumínium, réz-acél, acél-alumínium, alumínium-acél-alumínium stb. kombinációkkal. A plattírozott lemezek egyesítik az alkotó fémek jellegzetességeit, ezáltal lehetőséget adnak a gazdaságos és célirányos alkatrésztervezésre.

- A hagyományosan *hengerléssel végzett plattírozás* alkalmazhatóságát korlátozza az a tény, hogy a kötendő fémek fizikai, mechanikai paraméterei nem lehetnek túlságosan eltérőek, továbbá, hogy a plattírozható lemezvastagságok aránya kötött.



2. ábra A hengerlésekes plattírozás elve

- A *robbantásos eljárás* a plattírozás korlátait feloldja: egyrészt igen eltérő képlékenységgű, olvadáspontú és hőtágulási együtthatójú fémek egyesítésére alkalmas, másrészt a kötendő lemezek vastagságának aránya is széles határok között változtatható.



3. ábra A robbantásos plattírozás elve



4. ábra A hengerlésekes és a robbantásos plattírozás berendezései

A ROBBANTÁSOS PLATTÍROZÁS ELVE

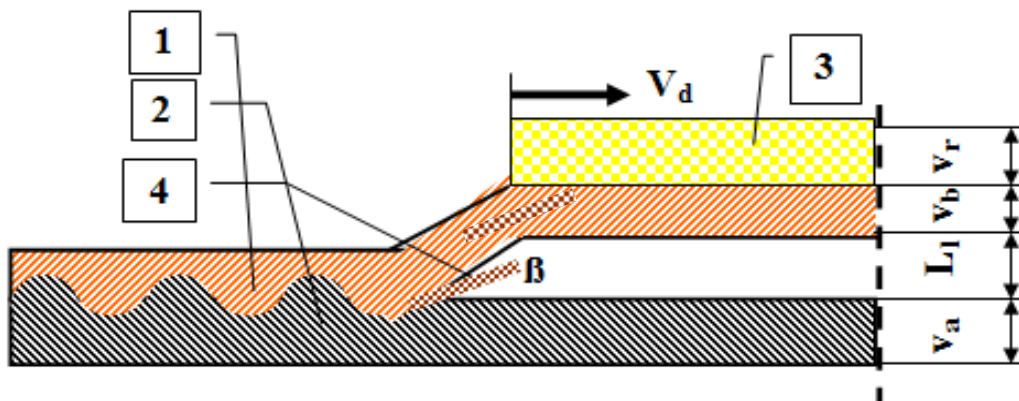
Azonos vagy eltérő anyagminőségű fémek felületi kötését lehet kialakítani oly módon, hogy a kötendő felületeket nagy sebességgel egymásnak ütköztetjük.

A kötés kialakulásának mechanizmusa

A plattírozás energiaforrása a robbanóanyag, „szerszáma” a detonáció kiváltásával létrehozott nagy energiatartalmú nyomáshullám. A robbanóanyag detonációja állandó, reprodukálható sebességgel játszódik le. A keletkezett gázok nyomása:

$$p = V_d^2 \rho_0 (\rho - \rho_0) / \rho \quad (1)$$

Ahol V_d a robbanóanyag detonációsebessége, ρ_0 a robbanóanyag sűrűsége, ρ a detonáció kiváltásával létrehozott gázok sűrűsége. A p nyomás értéke $10^4 - 10^5$ bar nagyságrendű. Az eljárás alapelvét az 5. ábra szemlélteti. A robbanás iniciálása után a detonáció v_d sebességgel terjed a robbanóanyagban. A létrejött gáz halmazállapotú termékek nyomása nagy sebességgel terjed át az 1 jelű burkolólemezzre, - az ún. „repülőlemezzre” - ami néhány száz m/s sebességre gyorsul fel és az l_1 „légrésen” átrepülve a sebességtől, tömegtől, elrendezéstől függő β szögben csapódik rá az alaplemezzre.



5. ábra A robbantással plattírozott kötés kialakulása
(1 – bevonólemez 2 – alaplemez 3 – robbanóanyag 4 – megolvadt fém sugar)

Az 1 bevonó lemez és a 2 alaplemez összezapódásánál fellépő nagy nyomás miatt az alaplemez benyomódik és a benyomódás mellett kidudorodás jön létre. Ugyanakkor az összezapódási zónából kifröccsen a megolvadt 4 fém sugar, ami az alaplemez és a bevonó lemez anyagából tevődik össze. A fém sugarat a folyamat előrehaladása során az alapfém kidudorodása fokozatosan eltéríti és a rácsapódó bevonó lemez bezárja. Ezután a becsapódási pont a kidudorodási pont tetejére tevődik át, majd az egész ciklus megismétlődik és jellegzetes hullámformájú kötés jön létre.



6. ábra Robbantással plattírozott alumínium-réz és acél-alumínium anyag kötési zónája (x50)

A fémes kötés létrehozásának feltételei

Jó minőségű kötés létrehozása érdekében a technológia paramétereit úgy kell méretezni, hogy az összezapódás pontjában a fémek képlékeny alakváltozása bekövetkezzék, de a létrejövő feszültségek a fémeket ne roncsolják. Ezek a feltételek a V_d detonációs sebesség és a V_δ összezapódási sebesség megfelelő értékével valamint a kötendő felületek tisztításával biztosíthatók.

A V_d detonációs sebesség hatása

A detonáció sebességével tovaterjedő nyomásimpulzus hatására a fémfelületen kialakuló feszültségek a detonáció sebességétől függően, különböző módon terjedhetnek a fém belseje felé:

- Hangsebesség alatti detonáció esetén ($V_d < V_h$ ahol V_h a hangterjedési sebessége az adott fémbe), képlékeny alakváltozás alakul ki a felületen, amely elnyeli a robbanás során a fémbe közölt energia egy részét. A képlékeny alakváltozás csak bizonyos mélységig terjed a fém belseje felé. A fémbe továbbhaladó nyomáshullám $V_d < V_h$ esetén nem veszélyes sem a fémre, sem a kötésre.
- Hangsebesség feletti detonációs sebesség esetén ($V_d > V_h$), képlékeny alakváltozás nem alakul ki. Ekkor a fémbe erősen lokalizált lökéshullámok keletkeznek, melyek a fém megrongálódásához vezethetnek.

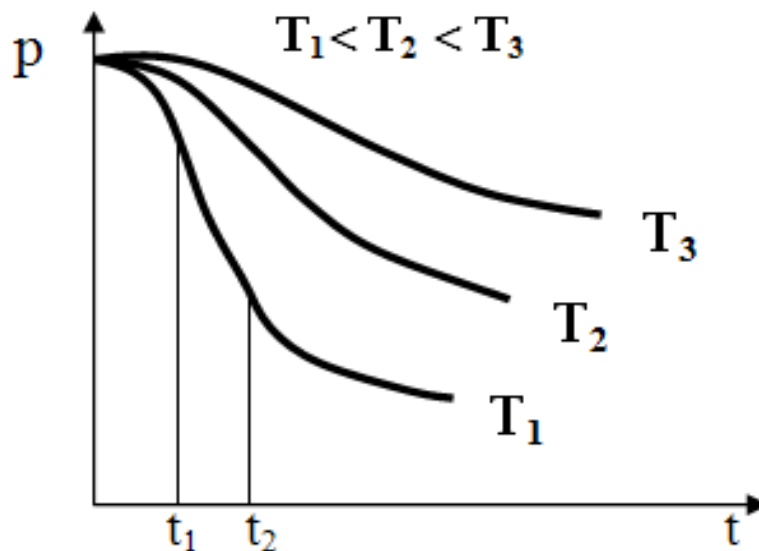
A sikeres plattírozás egyik feltétele tehát, hogy V_d / V_h kisebb legyen, mint 1.

A V_0 összecsapódási sebesség hatása

A lemezek összecsapódásának pontjában kialakuló nyomást a repülő burkolólemez V_0 sebessége határozza meg. A sebesség értékét a burkolólemezre ható erőimpulzusból lehet meghatározni:

$$J = \int_0^t p dt \quad (2)$$

ahol J a burkolólemez egységnyi felületére ható erőimpulzus, P a detonáció kiváltásával létrehozott gázok nyomása. A p nyomás nagysága a robbanóanyag paramétereitől függ, hatásának időtartama pedig a töltet vastagságával arányos (7. ábra).



7 ábra. A detonációs nyomás hatásának időtartama a töltetvastagság függvényében

A (2) egyenlettel leírt erőimpulzus nagysága egyenlő a 7. ábrán feltüntetett $p=f(t)$ függvényen a megfelelő T töltetvastagsággal paraméterezett görbe alatti területtel. Az előzők figyelembevételével mondhatjuk, hogy végeredményben a burkolólemez felületegységére ható erőimpulzus:

$$J = kT\rho_0 \quad (3)$$

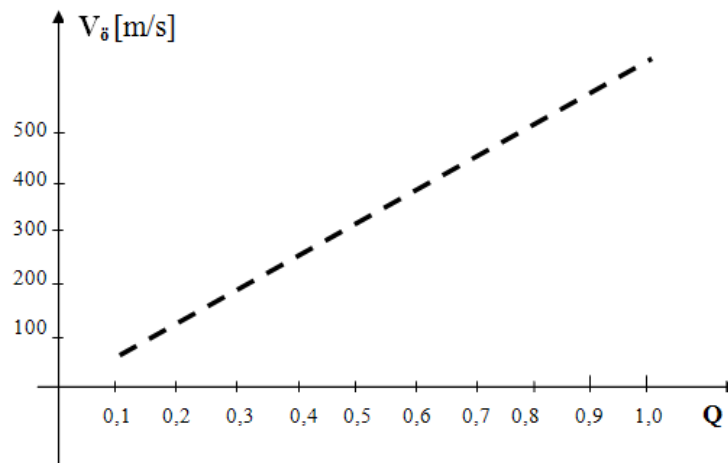
Ahol: k arányossági tényező, T a robbanótöltet vastagsága, ρ_0 a robbanóanyag sűrűsége. Másrészt viszont:

$$J = m_b V_{\delta} = \rho_b l_b V_{\delta} \quad (4)$$

Ahol: m_b a burkolólemez egységnyi felületének tömege, ρ_b a burkolólemez sűrűsége, l_b a burkolólemez vastagsága. A (3) és (4) egyenletek egybevetéséből adódóan:

$$V_{\delta} = k \frac{T\rho_0}{l_b \rho_b} = kQ \quad (5)$$

Végeredményben tehát a burkolólemez sebessége az összecsapódás pontjában arányos a Q paraméterrel: a robbanóanyag és a burkolólemez tömegének arányával. A $V_{\delta} - Q$ függvényt a 8. ábrán tüntettük fel.



8. ábra. Az összecsapódási sebesség és a tömegarány összefüggése

A V_{δ} sebesség nagyságára természetesen hatással van az alaplemez és a burkolólemez közötti l_1 távolság a „légrés”, ugyanis ahhoz, hogy a burkolólemez a becsapódásakor a megfelelő V_{δ} értéket érje el, a lemezek robbantás előtti elrendezésénél biztosítani kell egy minimális távolságot. A megfelelő V_{δ} érték tehát technológiailag a Q és az l_1 paraméterek megfelelő megválasztásával biztosítható. A szakirodalom adatai valamint az általunk végzett munkák eredményei alapján: $0,5 < Q < 1,5$ illetve $0,5 L_b < L_1 < 1,6 l_b$

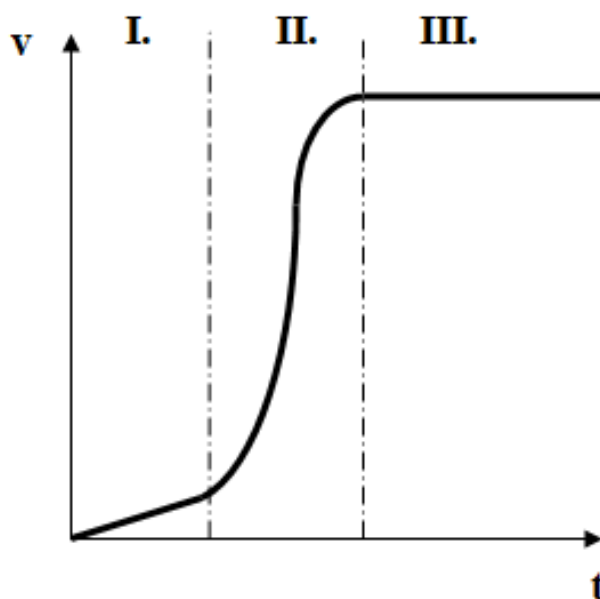
A fémfelületek tisztasága

A plattírozandó felületeknek a művelet előtt fémtisztáknak kell lenniük, mert a szennyeződések káros hatását sem a megolvadt fémsugár, sem a becsapódáskor kialakuló együttes alakváltozás nem tudja ellensúlyozni.

A jó minőségű kötés létrehozása érdekében tehát a technológia alapparamétereit, azaz a V_d detonációsebességet, a V_r robbanóanyag rétegvastagságot, az L_1 kiindulási lemeztávolságot a V_b bevonó lemez vastagságot, a V_a alaplemez vastagságát úgy kell méretezni, hogy az összecsapódás pontjában a fémek képlékeny alakváltozása bekövetkezzék, de a létrejövő feszültségek a fémeket ne roncsolják.

A ROBBANTÁSOS PLATTÍROZÁS ENERGIAFORRÁSA: A ROBBANÓANYAG

A robbantásos plattírozási eljárások energiaforrása a vegyi robbanóanyag. Az alábbiakban röviden összefoglaljuk a robbanással és a robbanóanyagokkal kapcsolatos főbb fogalmakat. Robbanás: az energiaátalakulás időben és térben való koncentrációja. Ez az energiaátalakulás lehet vegyi reakció, atommaghasadás, fémhuzalnak nagy áramimpulzus hatására történő elgőzölgése, stb. A vegyi robbanóanyagok olyan kémiai rendszerek, melyek hőfejlődés és gázformájú reakciótermékek képződése közben alakulnak át. Az átalakulás három lényeges formáját különböztetjük meg. (9. ábra):



9. ábra Gyorsuló robbanási folyamat
(I. égési szakasz - II. robbanási periódus - III. detonációs periódus)

Égés: viszonylag lassú, fokozatos átalakulás, mely helyi hőközlés hatására jön létre. Az égésfront néhány mm/s – 100 m/s sebességgel halad a robbanóanyagban.

Robbanás: közepes nagyságú (100 m/s – 1000 m/s), de nem stabil sebességgel haladó átalakulás. A robbanás helyén igen nagy a nyomásemelkedés.

Detonáció: igen nagy (1000 m/s – 10000 m/s) és egyenletes sebességgel haladó átalakulás, mely ütés, lökés hatására jön létre. A nyomás a detonációs frontban elérheti a 10^5 bart.

Az égés illetve a detonáció során felszabaduló energiák aránya kb. 1:4, a teljesítmények aránya $1:10^7-10^8$. A kétfajta átalakulás közötti különbséget szemlélteti a Nitrolikol robbanóanyag példája:

- égés: $C_2H_4(ONO_2)_2 = 2NO + 1,7 CO + 1,7 H_2O + 0,3CO_2 + 0,3H_2 + 460 \text{ cal/g}$;
- detonáció: $C_2H_4(ONO_2)_2 = 2CO_2 + 2H_2O + N_2 + 1600 \text{ cal/g}$.

A robbantásos megmunkálások alapja a detonáció kiváltásával elérhető nagy nyomás. A robbanóanyag detonációját villamos impulzussal váltjuk ki. A detonáció eredményeképpen hőfejlődés közben nagymennyiségű gáz képződik; ez jelentős térfogat növekedéssel jár, így a nyomás az adott térfogatban megnő. A robbanás teljes energiája:

$$E_t = E * m \quad (6)$$

Ahol E = a fajlagos robbanási energia (kJ/kg), az 1 kg tömegű robbanóanyag tökéletes átalakulása során felszabaduló hőmennyiség, M a robbanóanyag tömege. A keletkező gázok nyomása:

$$P = \frac{1}{4} \rho_0 D^2 \quad (7)$$

Ahol ρ_0 a robbanóanyag sűrűsége, D a detonációsebesség. Az anyag megmunkálási technológiák tervezése szempontjából legfontosabb robbanóanyag paraméterek tehát:

- E fajlagos robbanási energia;
- D detonációsebesség;
- V fajlagos gáztérfogot (1 kg tömegű robbanóanyag gáztermékeinek térfogata 1 bar nyomáson, 0 °C hőmérsékleten);
- ρ_0 sűrűség.

Az 1. táblázatban foglaltuk össze a leggyakrabban alkalmazott ipari robbanóanyagok legfontosabb jellemzőinek értékeit:

	Megnevezés	E kJ/kg	D m/s	V l/kg	ρ_0 g/cm ³	Forma
1.	Paxit	4190	4000	960	1,01	poralakú
2.	TNT	5066	6900	620	1,47	préstest
3.	Nitropenta	5895	8400	780	1,77	műanyag zsinórba burkolt por

1. táblázat robbanóanyagok paraméterei

A robbanóanyag detonációjának kiváltásával létrehozott nyomást különféle közvetítő közegek (levegő, víz, homok, műanyag, stb.) segítségével juttatjuk el – „transzformáljuk” – az alakítandó anyaghoz. Tájékoztatásul közöljük az energia átadási hatásfokok mért arányát: $\eta_{\text{levegő}} : \eta_{\text{homok}} : \eta_{\text{480}} = 1 : 240 : 480$

A ROBBANTÁSOS PLATTÍROZÁS GYAKORLATI KIVITELE

A technológiát a vörösréz-alumínium anyagpár kísérleti gyártásával mutatjuk be. A technológia fő lépéseit az alábbiakban foglaljuk össze:

1. lépés: A fémlemezek közül a vastagabb (példánk esetében az alumínium) kerül alulra: vagy közvetlenül a talajra, vagy a talajon elhelyezett kazánlemez alátétre (10. a. ábra).



10. ábra Robbantásos plattírozáshoz előkészített anyagok

2. lépés: A vékonyabb lemezt (példánk esetében a rézlemezt) egy adott távolságra helyezzük el az alaplemez fölött. A rézlemezen helyezzük el a műanyagból készített robbanóanyag tartályt (10. b. ábra).

3. lépés: A tartályban elhelyezzük a poralakú robbanóanyagot (11. a. ábra. ábra)

4. lépés: A robbanóanyagba helyezzük a villamos gyutacsot (11. b. ábra)



11. ábra. A robbanóanyagok előkészítése

5. lépés: A villamos gyutaccsal felrobbantjuk a robbanóanyagot (12. ábra)



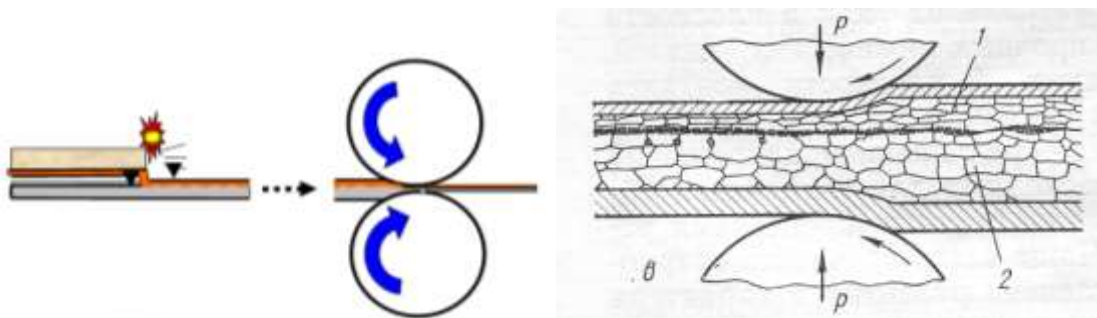
12. ábra Lőtéren végrehajtott robbantásos plattírozás

A BIMETÁLOK MINŐSÍTÉSI KÖVETELMÉNYEINEK MEGHATÁROZÁSA

A plattírozott lemezek alapvető vizsgálatai a kötőszilárdság ellenőrzésére irányulnak. Ezen vizsgálatok:

- az ultrahangos vizsgálat;
- nyíróvizsgálat (AD 2000 Merkblatt W8);
- alapvizsgálat: PED 97/23 EC;

A robbantással plattírozott lemezek félkész termékek, további megmunkálást igényelnek. Ezen megmunkálás leggyakrabban a hengerlés, mellyel a plattírozott lemezeket a késztermék kívánt vastagságára hengerlik, egyúttal a felületminőséget javítják (13. ábra)



13. ábra A robbantással plattírozott anyagok továbbalakítása hengerléssel

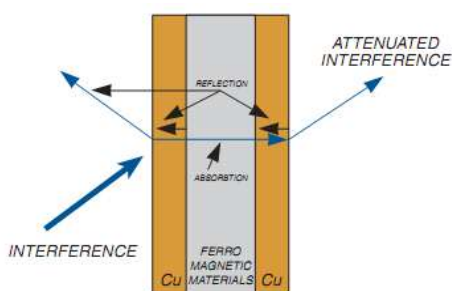


14. ábra Alumínium-réz plattírozott anyag és a belőle hengerelés után sajtolással készített alkatrészek

ISMERT REPÜLŐGÉPIPARI ALKALMAZÁSI PÉLDÁK

Elektromágneses és rádiófrekvenciás árnyékolás

A réz jó villamos vezetőképességét és a ferromágneses anyag (acél) permeabilitását kombinálva kis súlyú, jó hatásfokú EMI védelmet nyújtó anyag készült (TI-Shield™).



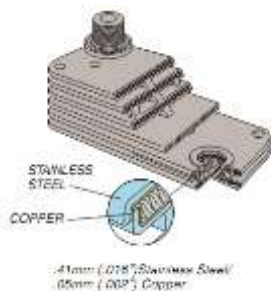
0.07mm (0.0028") Copper/0.21mm (0.0084")
49 Permalloy/0.07mm (0.028") Copper



15. ábra A TI-Shield™ anyag működési elve és a magyar réz-acél anyagminta

Forrasztott hőcserélő elemek

Az acélra plattírozott rézlemezek lehetővé teszik a folyasztószeres és egyéb adalékok nélküli, pontosan illeszthető forrasztások kivitelezését pl. hőcserélőknél.



16. ábra Repülőgép hőcserélőjénél alkalmazott acél-réz anyag és a magyar acél-réz anyagminta

Termobimetál: érzékelő és beavatkozó elem

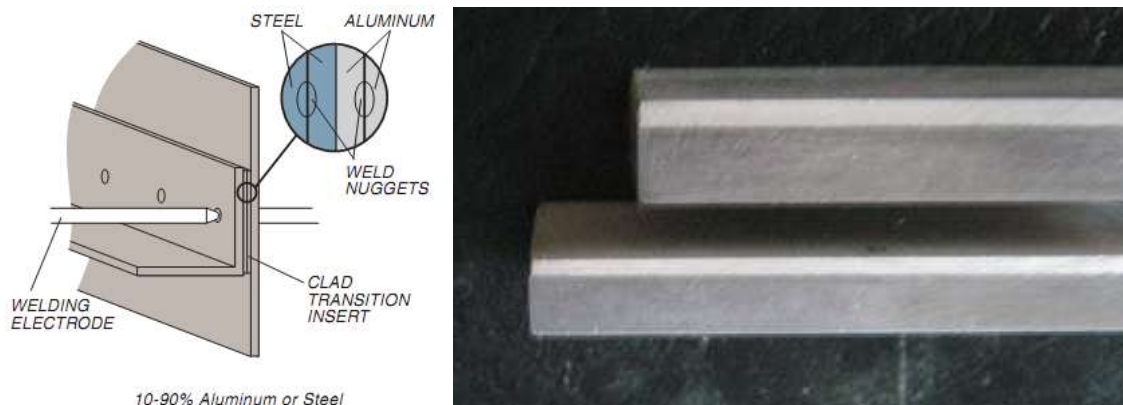
Invar és rézötvözet kombinációjú bimetal lemezt és alakos alkatrészt számos hidraulikai és villamos kapcsolásnál alkalmaznak.



17. ábra A termobimetál repülőgépi alkalmazásai és a magyar invar-sárgaréz anyagminta

Alumínium és acél szerkezeti elemek hegesztését lehetővé tevő betétlemez

A hegesztendő acél és alumínium szerkezeti elemek közé egy robbantással platírozott betétlemez illesztve megoldható, hogy az acél az acélhoz, az alumínium az alumíniumhoz legyen hegesztve.



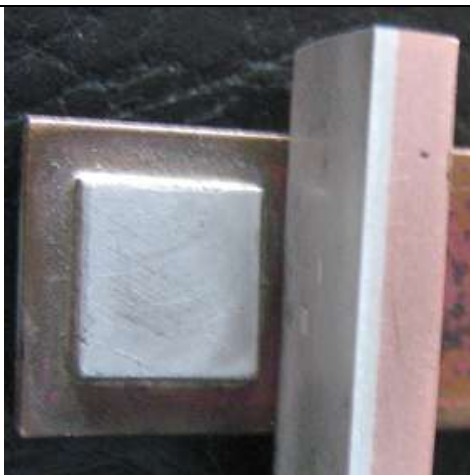
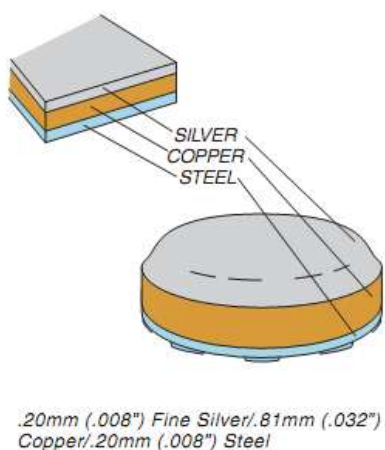
18. ábra Alumínium-acél közdarab alkalmazási példája



19. ábra Alumínium-acél közdarab alkalmazási példája és a magyar acél-alumínium illetve alumínium-acél-alumínium anyagminták

Nemesfém-takarékos, jó hődisszipációt biztosító alkatrészek

Villamos alkatrészekenél a mechanikai szilárdságot az acél, a jó villamos- és hővezetőképességet az ezüst és réz kombinációja biztosítja. A két- és háromrétegű kialakítások lehetővé teszik, hogy ezüstöt csak a minimálisan szükséges mennyiségben kelljen alkalmazni.



20. ábra Plattírozott villamos érintkező és a magyar ezüst-réz villamos érintkező mintaanyagok

A cikk a TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások című projekt keretében készült. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

The project was realised through the assistance of the European Union, with the co-financing of the European Social Fund.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] www.emsclad.com, Clad metal from Engineered Materials Solutions
- [2] GELMAN, A.Sz., Sajtolóhegesztés, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973.
- [3] BAUM F.A. ORLENKO, L.P., SZTANJUKOVICS, K.P., CSELISEV, B.P., SEHTER, B.I. A robbanás fizikája, Moszkva, 1975.
- [4] GINSZTLER J.-HIDASI B.- DÉVÉNYI L. Alkalmazott anyagtudomány, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.
- [5] S.M. ELASKARI, S.M., SZALAY A., PALOTÁS B., "A robbantásos hegesztés alkalmazása korrózióálló acélcsöveknél" Nemzetközi Hegesztési Konferencia, Budapest, 2000. június 6.-9.
- [6] MAMALIS, A.G., SZALAY A., RÁTH T., Preparation of metal/metal and metal/ceramic component parts by explosive compaction 5th EFEE World Conference 26-28 April 2009, Budapest, Hungary
- [7] MAMALIS, A.G., SZALAY A., Fabrication of bimetallic rods by explosive cladding and warm extrusion, J. of Mat. Proc. Techn., v 83, 1 Nov 1998.
- [8] GULBIN, A.B. Thermobimetals mechanical properties produced by explosive welding with rolling, J. de Phys. IV, v 7 n 3, Aug 1997.