

INŽENIRING POVRŠINE IZDELKOV IN POLIZDELKOV IZ ALUMINIJEVIH ZLITIN

Varužan Kevorkijan

Impol, d. d., Partizanska 38, 2310 Slovenska Bistrica; ZRVK, Betnavska cesta 6, 2000 Maribor

IZVLEČEK

V delu opisujemo najnovejše razvojne dosežke na področju funkcionalnih prevlek za izdelke na osnovi aluminija s poudarkom na industrijskih postopkih izdelave prevlek.

Surface engineering of aluminum-based semi and finished products

ABSTRACT

The R&D novelties in the field of functional coatings for aluminium-based products are described, with particular emphasis on the industrial processes of coatings fabrication.

1 UVOD

Nanašanje prevlek na površino izdelkov je inženirski koncept, ki se je zadnje čase zelo uveljavil v vojaški industriji ter v tujih vojskah⁽¹⁾. Najbolj so v uporabi t. i. funkcionalne prevleke⁽²⁾, s katerimi načrtno in v točno določenem delu struktur in komponent, kjer je to potrebno za njihovo nemoteno obratovanje, ustvarjamo oz. spreminjamo določeno lastnost ali kombinacijo lastnosti. V večini primerov je to le površinska plast komponent, ki je v funkcionalnem stiku z okolico v vseh vojaških uporabniških okoljih. Takšno načrtno in lokalno ustvarjanje in spreminjanje potrebnih lastnosti podaljšuje trajnost struktur in komponent, razširja področje uporabe tradicionalnih in cenejših surovin in odločilno prispeva k zmanjšanju stroškov. Namesto da bi iz praviloma zelo dragih materialov, ki zagotavljajo predpisane funkcionalne lastnosti, izdelali ves izdelek, se vse bolj odločamo za to, da izdelek izdelamo iz cenejšega materiala in ga le prevlečemo z dražjim materialom. Takšen način je po drugi strani posledica vse bolj izpopolnjenih zahtev, ki jih od proizvajalcev v vojaški industriji zahteva sodobni trg. Zaradi tega je vse manj materialov, ki bi sami zadostili dolgemu seznamu zahtev. Rešitev je v izdelavi večplastnih prevlek, kjer posamezne plasti zagotavljajo oz. spreminjajo le eno ali dve funkcionalni lastnosti, skupaj pa ustvarijo željeno kombinacijo, in če je potrebno, tudi gradientno spreminjanje lastnosti⁽³⁾.

Inženiring površine se je uveljavil tudi v aluminij-ski industriji, kjer so prevleke zelo pomembno področje spreminjanja lastnosti polizdelkov in komponent iz Al-zlitin v bojnih, vadbenih in skladiščnih uporabniških okoljih. Najbolj razširjeni postopki nanašanja zaščitnih prevlek na izdelke iz aluminija so barvanje, lakiranje s prahom, galvanizacija in anodna oksidacija. Samo v Nemčiji uporabijo v civilne in vojaške

namene na leto več kot 1 milijon ton različnih polizdelkov iz aluminija, med katerimi je 80 % prevlečenih⁽⁴⁾. Številne polizdelke iz aluminija uporabljajo tudi v vojaški industriji, npr. zlitine visoke plastičnosti serije 1xxx, 5xxx in 6xxx (za dele opreme ter bojne glave raketnih in artilerijskih projektilov). Za izdelavo sredstev oborožitve, v lahkih oklepni borbenih sredstvih, pri proizvodnji streliva in različnih raketnih izstrelkih, lahkih prenosnih mostovih ter inženirski opremi in izdelavi vojaških čolnov se aluminijeve zlitine (serije 5xxx in 7xxx) uporabljajo v obliki tankih in debelih pločevin (platiniranih ter neplatiniranih), stiskanih in vlečenih profilov ter palic, odkovkov in ulitkov.

S prevlekami lahko načrtno spreminjamo številne lastnosti površine in s tem razširjamo področje uporabe polizdelkov in komponent iz aluminija. Najbolj pogosto spreminjamo mehanske lastnosti (trdota), tribološke lastnosti (obrabna obstojnost, hrapavost, mazalnost, koeficient trenja), električne lastnosti (električna prevodnost, električna upornost), termične lastnosti (toplotna prevodnost, odpornost proti temperaturnim šokom), optične lastnosti (barva, sijaj, odsevnost), korozijske lastnosti ter tudi obstojnost proti kemikalijam in oksidaciji in niz drugih posameznih lastnosti, kot so difuzivnost, poroznost, sposobnost prijemanja ipd.

Poroznost je zagotovo ena izmed pomembnejših lastnosti prevlek. Vse prevleke so v neki meri porozne. Stopnja poroznosti prevlek je odvisna od postopka, pogojev in njihove kemijske sestave in je od 1 % do 20 %⁽⁵⁾. Čeprav so s stališča uporabnikov navadno kakovostnejše manj porozne prevleke, so tudi izjeme. Prevleke, ki jih uporabljamo zato, da ustvarimo toplotno pregrado, morajo biti porozne, da slabše prevajajo toploto.

Z razvojem novih postopkov nanašanja prevlek na izdelke iz aluminija proizvajalci težijo k temu, da ustvarijo večplastne in večnamenske prevleke, ki omogočajo načrtno spreminjanje številnih lastnosti površine izdelka hkrati. Postopki so izpeljani tako, da omogočajo kontinuirno nanašanje različnih materialov, kot so keramika, kovina, polimeri in barve, ob minimalni pripravi površine podlage.

2 SODOBNI POSTOPKI NANAŠANJA PREVLEK

Večino sodobnih postopkov nanašanja prevlek na izdelke iz aluminija izvajamo tako, da fini prah ali

kapljice napršimo na podlago^(5,6). V obeh primerih je vhodna surovina fini prah, iz katerega izdelujemo prevleko. Ko gre za termično pršenje, prah z nosilnim plinom uvajamo v plamensko ali plazemsko pištolo, kjer se delci prahu, ko letijo proti tarči, spotoma stalijo, tako da na površino podlage priletijo kot posamezne kapljice, ki se zlivajo v prevleko⁽⁵⁾. Poleg temperature na kakovost dobljene prevleke odločilno vpliva tudi hitrost kapljic, ki je večinoma nadzvočna. Čeprav je v delu plamena, kjer pride do taljenja delcev prahu, temperatura nad tališčem aluminija, je v coni izločanja kapljic na podlagi pod njegovim tališčem (navadno manj kot 100 °C), zato ob nanašanju prevleke ne prihaja do lokalnega taljenja površine podlage.

Novejša tehnologija (nizkotemperaturno pršenje⁽⁶⁾), ki so jo sredi osemdesetih let razvili v nekdanji Sovjetski zvezi in jo nato l. 1994 prenesli v ZDA in Evropo, omogoča, da delce napršimo na podlago pri temperaturah, ki so veliko pod njihovim tališčem. Z nosilnim plinom, segretim do temperature največ 700 °C, se delci prahu, ki jih želimo naprševati, vnašajo v šobo za naprševanje, kjer se pospešujejo do nadzvočne hitrosti 2–4 Mach in s tolikšno hitrostjo zadevajo podlago.

Vmesna tehnologija (HVOF – pršenje s plamenom napol staljenih delcev pri velikih hitrostih^(5,7,8)), ki so jo razvili predvsem zato, da z njo nadomestijo kromiranje s šestvalenčnimi spojinami kroma, za katere so v ZDA ugotovili, da so kancerogene⁽⁹⁾, omogoča pršenje delcev na podlago s hitrostjo 400–1800 m/s. Temperatura podlage je največ 170 °C.

Druga, zelo obetavna razvojna smer je inženiring površine z laserjem^(10,11), ki so jo razvili leta 1998 v ZDA. Proces je sestavljen iz dveh proizvodnih operacij. V prvem delu procesa se pri sobni temperaturi z razpršilno pištolo nanese na podlago približno 150 µm debela plast prekursorja (keramični prah, zmešan z vodno raztopino organskega topila). V drugi fazi se z industrijskim laserjem (npr. Nd:YAG- ali CO₂-laser) stali površinska plast podlage. Keramični delci se zaradi svoje večje mase prostornine vtisnejo in/ali kemijsko povežejo s staljeno plastjo podlage in ustvarijo prevleko.

3 OPIS NEKATERIH POSTOPKOV IN PREVLEK

3.1 Prevleke za puše valjev motorja z notranjim izgorevanjem

Sodobna smer zmanjševanja mase vojaških transporterjev (zaradi zahtev po večji taktični in strateški mobilnosti, sposobnosti plavanja, zračnega transporta ter večje nosilnosti) zahteva od proizvajalcev različnih bojnih vozil in transporterjev vse

večjo uporabo aluminija za izdelavo ohišij, oklepnih kupol, koles in delov motorja.

Nadomeščanje litoželeznih puš valjev s pušami, izdelanimi iz aluminijevih zlitin, je možno le, če so te ustrezno prevlečene s prevleko, ki zagotavlja veliko obrabno obstojnost, nizek koeficient trenja, mazalnost in čim slabše prevaja toploto. Postopki, ki so sedaj v uporabi, so: galvansko kromanje ali termični postopki, kot so plazemsko in obločno naprševanje.

Novost na tem področju so prevleke iz tankih plasti, izdelane s prej opisanimi postopki naprševanja. Pri plazemskem nanašanju tankih plasti na podlago iz aluminijeve zlitine, zaprto v reakcijski posodi pod vakuumom, ioni ali molekule plazme odnašajo atome snovi, iz katere izdelujemo prevleko in jih prinašajo na površino podlage. Navadno je debelina prevleke le nekaj mikrometrov.

Postopek so v preteklosti uporabljali pretežno za nanašanje prevlek na zunanje oz. bolj dostopne površine izdelkov. Novost je posebej izoblikovana paličasta katoda, ki omogoča nanašanje prevlek tudi na manj dostopne oz. notranje površinah izdelkov, kot so npr. puše valjev.

Po enem izmed že utečenih industrijskih postopkov prevlečejo pušo valja z večnamensko prevleko in valj nato vstavijo v izvrtino bloka motorja. Najnovejša tehnologija⁽⁴⁾, ki so jo razvili pri podjetju **Euromat GmbH**, omogoča, da vse to opravimo z eno samo proizvodno operacijo, tako da prevlečemo notranjo površino izvrtine valja, pri čemer kot reakcijsko posodo uporabimo kar samo izvrtino valja oziroma ohišje motorja.

3.2 Prevleke za ustvarjanje toplotne pregrade

Zgorevalna komora in deli motorja so pri obratovanju izpostavljeni precejšnjim termičnim obremenitvam, kar je posledica visoke (zaželeno je čim višje) delovne temperature in izmeničnih sprememb temperature. Zato bi bilo s stališča optimalnega izkoristka najboljše te dele izdelovati iz keramike, kar se v praksi ne obnese. Po drugi strani je uporaba monolitnih temperaturno obstojnih kovinskih materialov nezaželena zaradi njihove prevelike mase. Praktična rešitev tega problema je nanašanje keramične prevleke na notranjo površino zgorevalne komore in drugih delov motorja, narejenih iz aluminijevih zlitin. Zato da pri obratovanju temperatura sredice na osnovi aluminija ne bi preseгла kritične vrednosti, je treba s keramično prevleko, poleg veliko večje obrabne zdržljivosti, občutno zmanjšati prevajanje toplote.

Edini znan postopek, ki omogoča izdelavo takšnih keramičnih prevlek, je nanašanje prevleke s plazmo⁽⁴⁾. Značilnost tega postopka je, da se zaradi visoke

temperature plazme keramični delci stalijo, kar omogoča nastanek zelo gostih prevlek. Te so navadno iz ZrO_2 , stabiliziranega z Y_2O_3 .

Razlike v toplotni razteznosti kovinske podlage in keramične prevleke ublažimo z vmesno napršeno plastjo na osnovi MCrAlY (M je lahko kobalt, nikelj ali železo). Vmesni sloj omogoča tudi boljšo obstojnost proti koroziji, ki jo povzročajo vroči zgorevalni plini.

V praksi prevlečemo s keramično prevleko le najbolj izpostavljene dele posameznih komponent (kot so npr. dovodni ventili, sprednja stran bata in glava valjev), saj bi termična pregrada po celotni površini avtomobilskega dela privedla do njegovega pregrevanja.

3.3 Prevleke za bate motorjev z notranjim zgorevanjem na osnovi aluminija

Večino obstoječih delov motorja zaščitijo z anodno oksidacijo in ponikljanjem. Osnovna slabost obeh postopkov je, da so te prevleke porozne. Poleg tega je v praksi dostikrat težko doseči enakomerno rast prevleke in je zato na posameznih delih izdelka prevleko potrebno naknadno brusiti.

V obeh primerih nastaja precejšnja količina izplakovalne vode, ki jo je treba kemijsko nevtralizirati, kar poleg okoljevarstvenih težav negativno vpliva na ceno končnega izdelka. Postopka sta tudi sicer precej draga, saj porabljata veliko količino električne energije, vode, olja in plinov.

Daljša trajnostna doba prevlek in okolju prijaznejša proizvodna tehnologija sta združeni v novem postopku pridobivanja TiAlN-prevlek za avtomobilске bate na osnovi aluminija. TiAlN-prevleko pridobivamo s postopkom termičnega naprševanja pri nižjih temperaturah (največ do $160\text{ }^{\circ}\text{C}$). TiAlN-prevleka je dvakrat bolj trda kot prevleke, dobljene z anodno oksidacijo, in jo je mogoče enakomerno nanašati⁽⁴⁾.

3.4 Površinsko utrjene aluminijeve zlitine

Francosko podjetje **Almag** (del skupine **Morfa**) je vpeljalo v redno proizvodnjo nov proces utrjevanja površine polizdelkov in komponent iz aluminijevih zlitin⁽¹²⁾. Postopek omogoča, da na površini delov iz aluminijevih zlitin ustvarimo homogeno plast keramike.

Podobno kot pri zaščiti površine z anodno oksidacijo, del, ki ga želimo prevleči s keramično prevleko, potopimo v elektrolitsko kopel, ki je v tem primeru na osnovi SiO_2 , in skozi njo spustimo izmenični električni tok z napetostjo 800 V. Temperatura elektrolitske kopeli je $35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Površina izdelka se najprej prevleče s plastjo aluminijevega hidroksida, ki vsebuje številne nehomogenosti, kot so razpoke, jamice, vlakna in kratka, votla vlakna ("mikrocevrke"). Plast iz aluminijevega hidroksida nato elektrolitsko reagira z SiO_2 tako, da v približno 40 min zraste do $60\text{ }\mu\text{m}$ debela keramična plast na osnovi mulitne keramike ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$).

Poročajo o izjemni oprijemljivosti dobljene keramične prevleke s podlago; obrabna odpornost je štirikrat večja v primerjavi s površino aluminija, utrjeno z anodno oksidacijo. Trdota dobljene keramične prevleke presega $HV\ 2300$ in je primerljiva s trdoto korunda. Žica iz aluminija s premerom 1 mm postane potem, ko jo v **Almagu** prevlečejo s $100\text{ }\mu\text{m}$ debelo plastjo mulitne keramike, enako toga kot 1 mm debela žica iz jekla.

Izdelki iz aluminija, obdelani z **Almagovim** postopkom, lahko dlje časa obratujejo pri povišani temperaturi do $350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Keramična zaščitna plast ne prevaja električnega toka in zelo slabo prevaja toploto. Njena prebojna napetost je 20 kV/mm ; električna upornost keramične plasti debeline $100\text{ }\mu\text{m}$ presega $100\text{ }\Omega$. Poleg tega je dobljena keramična prevleka kemijsko obstojna proti kislinam, bazam in drugim agresivnim medijem, kot so morska voda in olja.

Potem ko z brušenjem in poliranjem odstranimo $15\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$ debelo površinsko plast **Almagove** keramične prevleke, nastane površina iz mulitne keramike z izjemno majhnim koeficientom trenja. Trenje lahko še dodatno zmanjšamo tako, da preprijemo vmesni prostor med posameznimi kristali v prevleki s smolo ali s polimerom. Komponente iz aluminija, elektrolitsko prevlečene z **Almagovo** prevleko na osnovi mulitne keramike, uporabljajo za ležaje in tirnice, za dele krogličnih ležajev ali za drsne sisteme brez mazalnega sredstva.

3.5 Prevleke iz kvazikristaliničnih aluminijevih zlitin za kuhinjske posode

Kvazikristalinične aluminijeve zlitine so zbudale v preteklosti pozornost zaradi svojih mikrostrukturnih značilnosti. Kasneje so raziskovalci ugotovili, da imajo te zlitine poleg izjemnih mehanskih in triboloških lastnosti še nadvse redko lastnost, da se na njih ne prijema praktično nobena snov. V laboratoriju za kovinske materiale francoskega raziskovalnega instituta **CNRS** so ustvarili **Cybernox** – kvazikristalinično aluminijevo zlitino proti prijemanju⁽¹²⁾. Zlitino so preizkusili za oblaganje kuhinjskih posod in ugotovili, da so plazemsko napršene prevleke iz **Cybernoxa** dovolj obstojne, da omogočajo nemoteno uporabo in pomivanje posode. **Cybernox**-prevleko izdelujejo s plazemskim naprševanjem tako, da kvazikristalinično zlitino v obliki finega prahu

vbrizgavajo z nosilnim plinom v plazemsko pištolo. Fini kvazikristalinični delci se stalijo, pištola naprši kapljice na podlago, kjer se te zlijejo v cca. 100 µm debelo plast.

Podjetje **SNMI**, lastnik multinacionalke **Saint-Gobain**, je odkupilo pravico uporabe vseh patentov v zvezi z zlitino Cybernox in proizvodnjo s Cybernoxom prevlečene kuhinjske posode. Industrijska proizvodnja poteka v podjetju **Sitram**, družinskem podjetju s 360 zaposlenimi, ki je odkupilo pravico proizvodnje prevlek na osnovi kvazikristaliničnih aluminijevih zlitin.

Po svojih lastnostih neprijemanja je Cybernox popolnoma primerljiv s teflonom. Cybernox ima tudi 2,5-krat večjo trdoto od nerjavečega jekla.

3.6 Luminiscenčne prevleke za aluminij

Emajliran aluminij združuje funkcionalne in estetske lastnosti stekla, kot so trdnost, kemijska obstojnost, visok sijaj in lep videz, s funkcionalnimi lastnostmi kovin (npr. s trdnostjo).

Začetki emajliranja aluminija segajo v petdeseta leta, ko so kot eno izmed glavnih sestavin za pridobivanje emajlov uporabljali spojine svinca. Sodobni emajli ne vsebujejo svinca. Emajliranje izdelkov iz aluminija je posebej priljubljeno v ZDA, kjer, med drugim, vgrajujejo velike količine emajliranega aluminija v vojaške ladje, kot sta npr. letalonsilki Forrestal in Saratoga.

Novost so fosforescenčni emajli⁽¹²⁾, ki jih izdelujejo z dodatki svetlečih pigmentov. Ti so toplotno obstojni do 600 °C, nato pa se pri višjih temperaturah razgrajujejo. Takšni emajli niso primerni za jeklene dele, ki jih emajliramo pri 830 °C, ampak jih lahko uporabimo le za emajliranje izdelkov na osnovi aluminija, ki jih emajliramo pri nižji temperaturi (cca. 550 °C).

Fosforescenčne emajle za aluminij izdelujejo v rumeno-zeleni, modri in modro-zeleni barvi.

Vzporedno s fosforescenčnimi emajli izdelujejo tudi fluorescenčne emajle⁽¹²⁾. Ti emajli, ki so popolnoma nevidni, nestrupeni in ne sevajo, oddajajo svetlobo, ko so izpostavljeni nevidni svetlobi kratke valovne dolžine, ki presega valovno dolžino UV svetlobe (t. i. "črna svetloba"). Barve nastajajo v popolni temi zaradi "osvetljenosti" predmeta s "črno svetlobo" in zbujajo pozornost zaradi svoje intenzivnosti. Fosforescenčne emajle uporabljajo za vojaške oznake, ki morajo ostati vidne tudi v popolni temi.

3.7 Prevleka "topocrom" za večjo obrabno zdržljivost

"Topocrom" je prevleka na osnovi kroma, ki jo ustvarimo s posebnim postopkom elektrolitskega nanašanja kovin na podlago⁽¹²⁾.

Površina topocroma je prekrita s ploskimi delci, katerih velikost in porazdelitev reguliramo z načrtnim spreminjanjem fizikalnih parametrov procesa galvanizacije. Tako lahko načrtno spreminjamo hrapavost in topografijo površine prevleke.

Pri **WMV** so v sodelovanju z **IPA, Stuttgart** (članom **Fraunhofer Association**), razvili nov postopek galvanizacije, ki omogoča pridobivanje prevlek z zelo majhnimi dimenzijskimi tolerancami. Večplastnosti prevleke po novem ne dosežemo tako, da prenašamo komponente iz kopeli v kopel, temveč se kemijske spremembe na površini komponente odvijajo v eni sami kopeli, neposredno ena za drugo⁽¹²⁾.

Večplastna struktura prevleke topocrom, s posebej izdelano trdo površinsko plastjo, omogoča izjemno obrabno zdržljivost in obstojnost proti mehanskim poškodbam⁽¹²⁾.

Topocrom so preizkusili v različne namene (npr. za zaščito ležajev in batnih vodil za dele motorja z notranjim zgorevanjem). Izkazalo se je, da je topocrom veliko bolj obstojen v primerjavi z drugimi prevlekami, dobljenimi z navadnimi postopki galvanizacije⁽¹²⁾.

3.8 PROTAL – Priprava površine in ustvarjanje prevleke v eni sami proizvodni operaciji

"Protal" je proces, ki so ga l. 1998 razvili v podjetju **Sulzer Metco**⁽¹²⁾. Omenjena tehnologija omogoča razmastitev in aktiviranje površine ter izdelavo prevleke v eni sami proizvodni operaciji. Razmastitev in aktiviranje površine potekata tako, da z industrijskim laserjem izhlapiamo maščobo in razgradimo plast oksida.

Vendar je znano, da se plast oksida na podlagi iz aluminija zelo hitro obnavlja ter zmanjšuje prijemanje prevleke na površino izdelka. Ta problem so v **Sulzer Metco** rešili tako, da so na robotsko roko poleg laserja za razmastitev in aktiviranje površine montirali še plazemsko pištolo, s katero napršijo prevleko. Prevleko nanesejo takoj po končani razmastitvi in aktiviranju površine, kar izključuje možnost vmesne oksidacije.

"Protal" je okolju prijazen postopek, ki porablja malo energije. Ker razmastitev, aktiviranje površine in izdelava prevleke potekajo v nizu, prihranimo čas. Prijemanje prevleke na površino podlage iz aluminija ali titana je enako, kot da bi površino podlage peskali s korundnimi kroglicami.

4 MOŽNOSTI RAZVOJA ZAŠČITNIH PREVLEK V IMPOL, d. d.

Inženiring površine polizdelkov in komponent iz aluminija za vojaško industrijo je razvojna pro-

blematika, s katero se Impol, d. d., želi sistematično ukvarjati, zlasti v sodelovanju s končnimi uporabniki – domačo ter Natovo vojaško industrijo in proizvajalci prevlek (IJS, Center za trde prevleke). Delež aluminija in drugih lahkih kovin (npr. magnezija) v vojaški opremi bo v prihodnje možno povečevati le ob nadomeščanju funkcionalno vse bolj zahtevnih delov, ki jih vojaška industrija zaenkrat proizvaja iz jekla, litega železa in podobnih tradicionalnih materialov. Nezadostne mehanske, tribološke in termične lastnosti aluminijevih in še posebej magnezijevih zlitin omejujejo nadaljnje nadomeščanje jeklenih oz. lito-železnih delov z deli iz lahkih kovin. Zato bo treba med drugim razviti večplastne kompozitne materiale s sredico iz lahke kovine in večslojno površinsko plastjo, sestavljeno iz posebnih inženirskih materialov. Razvoj takšnih materialov in njihova nadaljnja predelava v polizdelke in končne izdelke je zagotovo del prihodnosti aluminijske industrije.

Impol je ta svoj interes že izkazal ob sofinanciranju raziskav sinteze zelo trdih (do 42 GPa!) kompozitov $\text{AlMgB}_{14}\text{-TiB}_2$ (aplikativni projekt; nosilec ZRVK, sodelujoči organizaciji IJS, Impol), ki jih je možno plazemsko naprševati na podlago iz Al-zlitin. Tovrstne prevleke, ki imajo poleg izjemne trdote tudi

zelo nizek koeficient trenja (in jih zaradi teh koristnih lastnosti ameriška vojska intenzivno preučuje), bi po našem mnenju poleg tradicionalnih, katerih površinsko aplikacijo bi bilo treba implicirati na Impolovih polizdelkih, zanimivih za vojaško industrijo, lahko domači vojaški industriji zagotovil pomembno primerjalno prednost (npr. v programih protidobav).

LITERATURA

- ¹N. B. Dahotre, S. Seal, JOM, 53 (2001) 9, 43
- ²R. Y. C. Tsui, Comprehensive composite materials, Volume 3, Metal matrix composites, 1st ed., Elsevier 2000, p. 247
- ³A. L. Greer, Comprehensive composite materials, Volume 3, Metal matrix composites, 1st ed., Elsevier 2000, p. 321
- ⁴B. Schmidt, M. Feldhege, I. J. Rass, Aluminium, 75 (1999) 4, 290
- ⁵F. M. J. van der Berge, Advanced materials & processes, 154 (1998) 12, 31
- ⁶A. Papyrin, Advanced materials & processes, 159 (2001) 9, 49
- ⁷B. D. Sartwell, P. E. Bretz, Advanced materials & processes, 156 (1999) 2, 25
- ⁸D. Moore, Advanced materials & processes, 155 (1999) 14, 31
- ⁹D. Duclos, Advanced materials & processes, 159 (2001) 2, 49
- ¹⁰A. Agarwal, N. B. Dahotre, Advanced materials & processes, 157 (2000) 4, 43
- ¹¹N. B. Dahotre, S. Nayak, O. O. Popoola, JOM, 53 (2001) 9, 44
- ¹²Aluminium, 77 (2001) 4, 166