

MOGUĆNOSTI REGENERACIJE DELOVA BRODSKIH GASOTURBINSKIH MOTORA PRIMENOM METODE METALIZACIJE PLAZMA POSTUPKOM

Dautović D. Jovo, Vojska Srbije, Tehnički opitni centar,
Beograd

OBLAST: mašinstvo, tehnologija površinske zaštite metala

VRSTA ČLANKA: stručni članak

Rezime:

U radu je prikazana mogućnost regeneracije delova brodskih gasoturbinskih motora metodom metalizacije plazma postupkom. Jedan od najsavremenijih postupaka metalizacije je plazma postupak, koji ima više prednosti i specifičnosti u odnosu na druge postupke metalizacije. U ovom radu biće obrađeni postupci metalizacije, odnosno postupak metalizacije plazma-postupkom i mogućnosti primene tog postupka kod regeneracije delova brodskih gasoturbinskih motora (GTM).

Ključne reči: regeneracija delova, metalizacija, plazma postupak, prevlaka.

Uvod

U savremenim uslovima održavanja mašinskih delova, sklopova i tehničkih materijalnih sredstava (TMS) sve više se javlja potreba da se oštećeni i pohabani mašinski delovi regenerišu, jer se time znatno smanjuje cena remonta i održavanje TMS.

Naučna dostignuća iz oblasti metoda regeneracije dala su više tehnoloških rešenja koja omogućavaju postizanje takvih rezultata da svojstva regenerisanih delova po svojim karakteristikama prevazilaze svojstva novih delova ili bar zadržavaju kvalitet novih.

Za izvođenje regenerativnih zahvata primenjuje se više metoda u zavisnosti od vrsta materijala, oblika oštećenja, konstruktivno-tehnoloških karakteristika oštećenog dela, uslova rada i mogućnosti primene pojedinih metoda u datim uslovima.

U ovom radu biće obrađeni postupci metalizacije, odnosno, postupak metalizacije plazma-postupkom i mogućnosti primene tog postupka kod regeneracije delova brodskih gasoturbinskih motora (GTM).

Metalizacija (raspršivanje po površini metala)

Nabrizgavanje metala je jedna vrsta obrade površine materijala koja se već nekoliko decenija primenjuje za zaštitu od korozije, za popravak nanošenjem jednog sloja na istrošene površine delova, kao i za druge svrhe. Prvi uređaj za nabrizgavanje napravio je Šop 1910. godine u Švicarskoj. Nabrizgavanje može u nekim slučajevima zameniti druge postupke obrade kao što su: galvanizacija, pocinkavanje, alitriranje, bojenje komprimiranim vazduhom, elektrostatičko nanošenje slojeva i neke druge [1].

Metalizacija je proces raspršivanja plamenom, pri kojem se koriste metalne (ili keramičke) prevlake, za presvlačenje površina u toku procesa proizvodnje, za povećanje otpornosti na habanje, toplotu i koroziju.

Proces termičkog raspršivanja sastoji se od zagrevanja metala (ili nemetalnih materijala) i njegovog izbacivanja u atomiziranom obliku na podlogu. Materijal izvorno može biti u obliku žice namotane na kalem, ili u obliku praha zagrejanog do stanja topljenja oksigensko-gasnim plamenom. Ako se za raspršivanje koristi prah, on se na mesto metalizacije dovodi pištoljem, iz suda montiranog na njemu i nosača plamena, sistemom za dovod vazduha. Komprimirani vazduh mora da bude čist, filtriran i tačno regulisan za uniformnu atomizaciju. Kao gasovito gorivo za održavanje plamena može da se koristi acetilen, propan ili vodonik, koji su naročito pogodni za plameno prskanje metala sa malim tačkama topljenja, kakvi su na primer: aluminijum, cink i drugi.

Danas je poznato više postupaka metalizacije, od kojih su u industrijskoj primeni najčešći: a) metalizacija žicom; b) elektrolučna metalizacija; c) metalizacija prahom; d) metalizacija Dimond Jet procesom i e) metalizacija plazma-postupkom.

Metalizacija plazma-postupkom

Osnovni pojmovi o plazma prevlakama

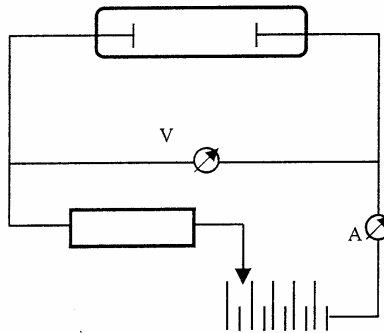
Naziv plazma nastao je kao potreba da se opiše stanje materijala, koji je doveden u parno stanje na viši energetske nivo od običnog gasovitog stanja.

Sa nekim oblicima plazme čovek se sretao odvajkada, kroz zvezde, munju, vatru i severnu svetlost.

Egzaktno naučno čovekovo bavljenje plazmom novijeg je datuma i počinje negde u drugoj polovini 19. veka intenzivnijim izučavanjem električnog pražnjenja u gasovima.

Posebno interesovanje pobuđivalo je tzv. tinjavo pražnjenje, koje se uspostavlja u uređaju, šematski prikazanom na slici 1. Ono nastaje ukoliko je pritisak gasa u cevi za pražnjenje vrlo nizak (ispod 100 Pa) i ukoliko je

napon između elektroda iznad kritične vrednosti U_s , tzv. napon pražnje-
nja. Utvrđeno je da ovaj napon zavisi od ukupnog broja atoma gasa u me-
đuelektrodnom prostoru, tj. od proizvoda $p \cdot d$ (pritisak gasa u cevi,
 d – rastojanje između elektroda) i da pri izvesnoj vrednosti tog parametra,
slika 2, zavisnoj od prirode gasa, on ima minimum (tzv. Paschenov zakon).

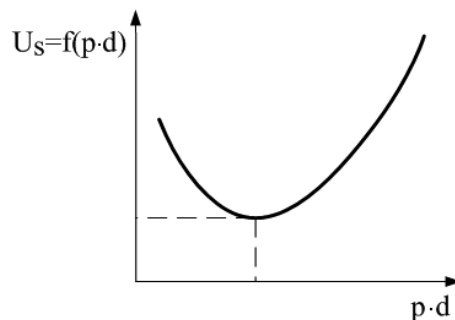


Slika 1 – Šematski prikaz uređaja za proučavanje karakteristika gasnog pražnjenja
Figure 1 – Schematic of a device for testing the gas discharge characteristics

U upaljenom tinjavom pražnjenju oko obe elektrode obrazuje se ne-
koliko uočljivih, naizmenično raspoređenih svetlih i tamnih zona. Idući od
katode ka unutrašnjosti gasa, nailazi se, redom, na Astonov (Aston) tam-
ni prostor, katodno tinjanje, Kruksov (Crookes) tamni prostor, negativno
tinjanje i Faradejev (Faraday) tamni prostor, a idući od anode, opet ka
unutrašnjosti gasa, zapaža se anodni tamni prostor i anodno tinjanje.

Najveći deo cevi za pražnjenje ispunjen je intenzivno svetlećim pozi-
tivnim stubom, koji je našao primenu kod „neonskih” reklama.

U pozitivnom stubu, gas u cevi za pražnjenje nalazi se u vrlo specifičnom
fizičkom stanju, za koje je Kruks 1879. godine rekao da predstavlja četvrto
agregatno stanje, a koje je Lagmur (Lagmuir) 1929. godine nazvao *plazma* [2].



Slika 2 – Ilustracija Paschen-ovog zakona: napon paljenja u funkciji proizvoda p·d
Figure 2 – Illustration of Paschen's law: ignition voltage as a function of p·d product

Sintagma „plazma – četvrto agregatno stanje“ ubrzo ulazi u svakodnevnu upotrebu, te je i fizičari tako prihvataju, ne samo kao lepo sročenu stilsku figuru već se za njenu upotrebu može naći i dublje fizičko opravdanje.

Stanje gasa određeno je vrednošću srednjih energija po jednoj čestici. Ova energija izražava se u elektron-voltima (eV).

Jedinica 1eV predstavlja srednju kinetičku energiju toplotnog kretanja jednog molekula gasa na temperaturi od oko 10.000 K (tačnije 11.600 K).

U čvrstom agregatnom stanju srednje energije po jednoj čestici kreću se od 10^{-3} eV do 10^{-2} eV, a u tečnostima 10^{-2} eV do 10^{-1} eV.

Kod gasova, srednja energija po čestici kreće se u dijapazonu od 10^{-1} eV do 1eV.

Daljim dovođenjem energije sistemu, u rasponu od 1eV do 10eV, dovodi se u stanje plazme.

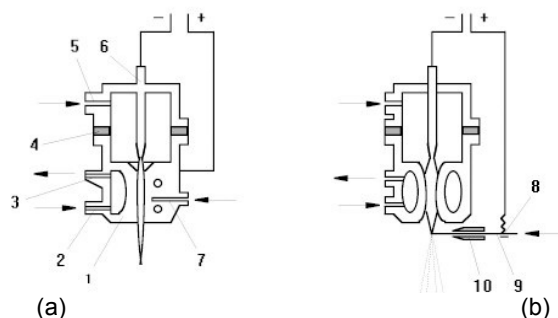
Plazma je našla primenu, u sledećim oblastima: elektronici i telekomunikacijama, gasnim laserima sa električnim pražnjenjem, plazmenim izvorima svetlosti, plazmenoj hemii i primeni plazme u metalurgiji.

Pobuđivanje i prevođenje u stanje plazma-gasa vrši se jonizacijom pomoću visokonaponskog luka, koji nastaje između anode i katode u pištolju.

Visokonaponski luk jednosmerne struje formira se između negativne elektrode od tungstena i komore hladene vodom koja predstavlja pozitivnu elektrodu. Inertni gas, npr. argon, pod pritiskom se ubacuje u prostor između elektroda, koji je zagrejan do temperature između 8.000°C i 16.000°C . Vreli mlaz plazme prolazi velikom brzinom kroz mlaznik od bakra, hlađen vodom, a pri tome metal u obliku praha, koji se koristi za prevlaku, biva injektiran u vreli gas plazme, gde se topi i nanosi na podlogu.

Na slici 3 prikazan je izgled preseka jednog plazma pištolja (brenera) [3].

Kao plazma gas najčešće se koriste argon ili azot, koji se ujedno koriste kao izvor toplote i kao sredstvo za transport istopljenih čestica.



Slika 3 – Strukturna šema plazma pištolja za prah (a) i za žicu (b)
 1 – Cu sapnica, 2,3 – ulaz i izlaz vode, 4 – izolacioni prsten, 5 – ulaz gasa za plazmu,
 6 – volfram elektroda, 7 – dodavanje praha za nabrizgavanje, 8 – kontakt struje, 9 – žica
 za nabrizgavanje, 10 – cev vodilica

Figure 3 – Schematic of the plasma gun for powder (a) and wire (b)

Na slici 4 prikazano je nanošenje prevlake na rukavac kolenastog vratila plazma-pištoljem za prah [3].



Slika 4 – Nanošenje prevlake na rukavac kolenastog vratila plazma pištoljem
Figure 4 – Coating deposition on a crankshaft pin by the plasma gun

Prah za metalizaciju uvodi se pod određenim pritiskom u plazma mlaz. Čestice praha se tope i vrši se njihovo nanošenje velikom brzinom na pripremljenu površinu.

Kao rezultat ovog procesa dobija se prevlaka visokog kvaliteta u pogledu homogenosti i vezivne moći.

Instalacija za nanošenje plazma prevlake sastoji se od sledećih komponenti:

- a) **upravljačke kabine**, koja se sastoji od: dovoda vode za hlađenje plazma-pištolja; izvora napajanja strujom i dva spremnika gasa. Jedan spremnik komprimiranog, primarnog, gasa koji može biti azot ili argon i jedan spremnik komprimiranog, sekundarnog, gasa koji može biti vodonik ili helijum;
- b) generatora struje;
- c) **distributera komprimiranog praha** sa kontrolom potrošnje i pneumatskim transportom praha do plazma-pištolja.

Plazma-gas se uvodi u plamenu komoru. Tu se vrši mešanje primarnog gasa, argona ili azota, sa sekundarnim gasom, vodonikom ili helijumom (sekundarni gas se ne koristi kod svih plazma prevlaka).

Električni luk se proizvodi dovođenjem struje između tungsten aksijalne katode i bakarne anode, koja ima oblik mlaznice. Gas, koji se uvodi u taj međuprostor, jonizuje se i izlazi u vidu plazme.

Prah, koji se želi naneti, ubacuje se (injektira se) u plazmu, na nekoliko milimetara od izlaznog preseka anode, rastapa i u stanju plazme nabacuje na površinu, na koju se nanosi prevlaka.

Gas, nosač praška (azot ili argon), istog je pritiska kao i primarni gas i potiču iz istog spremišta.

Vrste i podela plazma prevlaka

Poznat je veliki broj raznih materijala koji se koriste za stvaranje plazma prevlaka, koje prema sastavu mogu biti:

- *prevlake na bazi gvožđa, nikla, kobalta, nerđajućih i ugljeničnih čelika, egzoterni nikel- aluminijum;*
- *prevlake od samotečnih legura (legura hroma, volframa i kobalta);*
- *prevlake od obojenih metala (bronze, aluminijum, mesing, bakar itd.);*
- *oksidokeramičke prevlake (aluminijum-oksidi, hrom-oksidi, kompozitni materijali na bazi titan-dioksida, cirkonijum-dioksida, magnezijum);*
- *volfram-karbidne prevlake (kompozitni materijali na bazi volfram-karbida, kobalta, mešavine karbida i kobalta);*
- *hrom-karbidne i ostale prevlake na bazi mešavine hrom-karbida i nikel-aluminida;*
- *teško topivi metali: molibden, volfram, tantal itd.;*
- *bor-nitridi i aluminijske bronze, hrom-nikel i aluminijum-grafit, oksido-keramičke mešavine;*
- *prahovi sa plastičnom osnovom, poliesteri i silicijum-aluminijum, mešavine aluminijske bronze sa poliestrom.*

Najvažniji zahtevi koje prevlake treba da zadovolje jesu otpornost na: habanje u svim uslovima; abraziju; trenje i ciklično opterećenje; kavitaciju; eroziju; oksidaciju i toplotnu koroziju; atmosfersku koroziju i koroziju u uslovima kvašenja i potapanja.

Svi navedeni tipovi prevlaka mogu se, prema vrsti prevlaka, svrstati u tri glavne grupe: a) zaštitne prevlake od visokotemperaturne oksidacije i korozije, b) zaštitne prevlake od toplote i c) zaštitne prevlake od habanja.

a) Zaštitne prevlake od visokotemperaturne oksidacije i korozije. Prevlake otporne na visokotemperaturnu oksidaciju i koroziju koriste se na delovima GTM koji su podložni visokotemperaturnoj oksidaciji i koroziji, kao što su sprovodni venci i lopatice kompresora.

b) Zaštitne prevlake od toplote. Tanak sloj oksida na prevlakama djeluje, do izvesnog stepena, kao termička barijera, zbog toga što poseduje relativno niži koeficijent toplotnog provođenja.

Efektivnost takve barijere proporcionalna je debljini oksida, te se s toga i primenjuju relativno debeli slojevi od 100–500 mm.

Prevlake se zasnivaju na cirkonijum-dioksidu koji je stabilizovan itrijum oksidom.

c) Zaštitne prevlake od habanja. Prevlake otporne na habanje omogućavaju duži i pouzdaniji ciklični vek delova GTM, kao što su lopatice kompresora i elementi agregata.

Prevlake otporne na habanje su na bazi nitrida i karbida elemenata: titana (Ti), tantala (Ta), hroma (Cr), molibdena (Mo), cirkonijuma (Zr), hafnijuma (Hf) i drugih.

Primena tehnologije plazma prevlaka na delovima brodskih gasoturbinskih motora

Mogućnost primene plazma prevlaka na brodskim GTM

Pri projektovanju GTM, koji se primenjuju, kao brodski pogonski uređaji, neophodno je rešiti niz složenih tehničkih i konstrukcionih problema vazanih za zaštitu od prisustva morske vode u GTM.

Ispitivanja brodskih pogonskih grupa sa GTM, sa prisustvom morske vode u protočnom traktu, pokazala su gubitak snage i intenzivniju koroziju lopatica.

Na primer, kod motora AI 24 (ugrađenog na brod „Tajfun“), na ispitnoj stanici, kada se u protočni trakt ubrizgavala morska voda u trajanju od 45 min, protokom od 12,5 l/min, konstatovan je gubitak snage motora od 8%.

Nakon rastavljanja motora konstatovana je potpuna pohabanost mekih zaptivnih prevlaka na radnim prstenovima i sprovodnim aparatima kompresora, te lopaticama kompresora.

Zbog navedenih problema, neophodno je potpuno zaštititi motor od ulaska morske vode, a primenom plazma prevlaka zaštititi navedene elemente sklopova.

U radu je prikazana primena tehnologije plazma prevlaka na komori sagorevanja i turbini visokog pritiska GTM M8G, proizvedenog u bivšem SSSR-u.

GTM se sastoji se od sledećih glavnih delova: a) kompresora niskog pritiska; b) kompresora visokog pritiska; c) komora sagorevanja; d) turbine visokog pritiska; e) turbine niskog pritiska; f) pogonske turbine i g) ispusnog voda [4].

Za primenu tehnologija plazma prevlaka neophodno je poznavati konstrukciju GTM sa termičkim i gasodinamičkim parametrima, kao i uslove eksploatacije i moguće otkaze.

Komore sagorevanja

Komora sagorevanja (slika 5) deo je GTM u kojem se vrši kontinuirano sagorevanje dovedenog goriva u struji vazduha dovedenog iz kompresora.

Plamene cevi su osnovni sklop komore sagorevanja i u njima se hemijska energija dovedenog goriva pretvara u toplotnu energiju sagorelih gasova, koji dalje pokreću turbine.

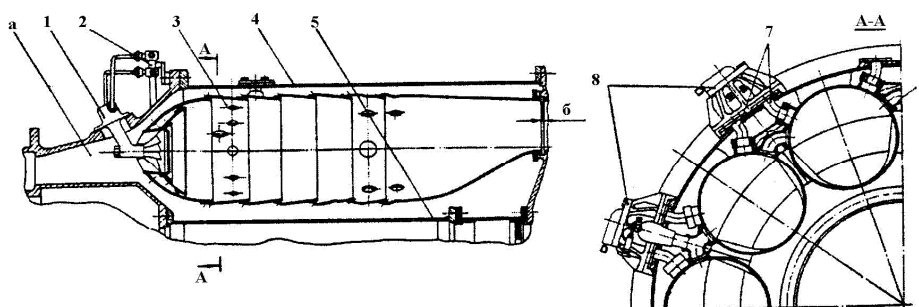
Materijali koji se primenjuju za izradu pojedinih delova komore sagorevanja određeni su temperaturama zagrevanja u toku rada.

Plast komore sagorevanja zagreva se približno i do 500°C i obično se izrađuje od legiranog čelika otpornog na visoke temperature

Plamena cev je termički najopterećeniji deo i u njoj temperatura dostiže do 900°C. Za izradu plamene cevi neophodni su vatrootporni materijali koji moraju ispuniti zahteve za visoku čvrstoću, puzanje, otpornost na gasnu koroziju, nisku sklonost ka prskanju i vitoperenju.

Pored toga što se, pri razvoju i konstruisanju komora sagorevanja, poštuju navedeni kriterijumi za izradu, u eksploataciji se dešavaju različiti defekti.

Da bi se ti defekti izbegli moguće je vršiti zaštitu površina komora sagorevanja prevlakama otpornim na visokotemperaturnu oksidaciju i koroziju.



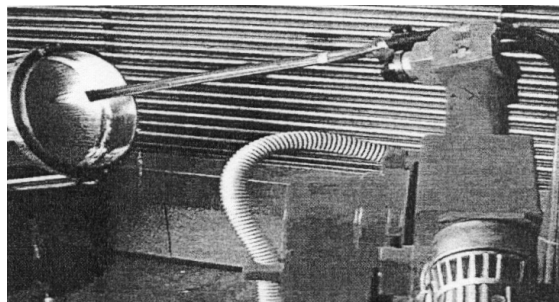
Slika 5 – Komora sagorevanja

- a) difuzor; b) zazor radi toplotnog širenja; 1. rasprskič; 2. kolektor goriva;
3. plamena cev; 4. plašt komore sagorevanja; 5. plašt vratila turbine;
6. međuspoj komore sagorevanja; 7. fiksator; 8. ventil za ispuštanje vazduha

Figure 5 – Combustion chamber

Materijal osnovnog sloja – osnovne prevlake je Ni/Al 5%. Kao materijal prevlake međusloja može se koristiti keramička mešavina npr. cirkonijum oksid i magnezijum oksid, a kao završni sloj čista keramika.

Na slici 6 prikazan je postupak nanošenja zaštitne prevlake na komoru sagorevanja.



Slika 6 – Nanošenje zaštitne prevlake na komoru sagorevanja

Figure 6 – Protective coating deposition on the combustion chamber

Turbina visokog pritiska

Turbina visokog pritiska (TVP), slika 7, deo je GTM koji pogoni KVP. Turbina visokog pritiska je aksijalna, reakciona dvostepena..

Jedan od najopterećenijih delova TVP je rotor turbine, koji se sastoji od vratila i diskova sa radnim lopaticama.

Primena plazma tehnologije na elementima turbine visokog pritiska je velika.

Zaštitne prevlake mogu da se koristei na radnim lopaticama, sprovodnim lopaticama, diskovima, lavirintnim zaptivkama, osloncima ležaja i delovima kućišta.

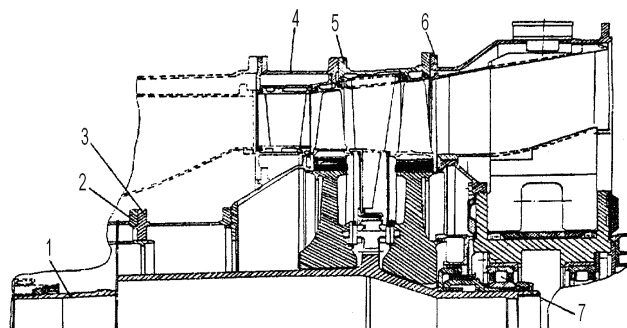
Čaura lavirinta je ta koja se troši usled habanja i nju je moguće regenerisati nanošenjem *plazma prevlake*, npr. od *Ni-grafita (METCO 307 NS)*.

Posebno su opterećene lopatice turbine, jer su, pored ostalog, izložene delovanju visokih temperatura i agresivnom delovanju sagorelih gasova. Takvi gasovi prouzrokuju eroziju, koroziju, oksidaciju i termički zamor materijala.

Da bi se to izbeglo, lopatice se „presvlače“ prevlakama otpornim na visokotemperaturnu koroziju i oksidaciju.

Zaštita ovako opterećenih delova je višeslojna. Osnovni sloj, odnosno osnovna prevlaka je na bazi Ni/Al 5%.

Završni sloj je prevlaka na bazi oksidne keramike ZrO_2 modifikovane oksidima MgO.



Slika 7 – Turbina visokog pritiska

- 1 – rotor turbine visokog pritiska; 2 – plašt osovine; 3 – umetak;
4 – sprovodni aparat I stepena; 5 – sprovodni aparat II stepena;
6 – nosivi venac turbine visokog pritiska; 7 – valjkasti ležaj

Figure 7 – High-pressure turbine

Pored navedenog, vrlo zastupljena primena plazma prevlaka je na održavanju minimalnog zazora između kućišta i samih lopatica, kako kod turbina tako i kod kompresora.

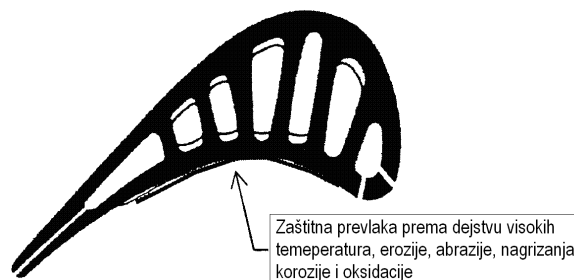
Ovo se postiže presvlačenjem dela vrha lopatica slojem metala nanesenim plazma tehnologijom.

To su mekane i abrazivne prevlake koje uzrokuju niskoenergetske uslove trenja i koje su otporne na eroziju.

Njihova uloga je da se habaju umesto da uzrokuju habanje.

Za kompresore se mogu koristiti prahovi na bazi smeša legura AISi i poliestera i kompozitnih prahova Ni – 25 C grafit i Ni – 15 C grafit.

Na slici 8. prikazan je presek turbinske lopatice visokog pritiska sa filmom za hlađenje i zaštitnom termičkom prevlakom [5].



Slika 8 – Presek turbinske lopatice visokog pritiska sa filmom za hlađenje i zaštitnom termičkom prevlakom

Figure 8 – Cross-section of a high-pressure blade with a cooling film and a protective thermal coating

Metodologija regeneracije delova GTM tehnologijom plazma prevlaka na atmosferi

Pod pojmom nanošenje plazma prevlaka, na delovima gasnih turbina, podrazumeva se proces taloženja para elemenata čija se prevlaka želi naneti na površinu dela.

Ovaj proces može se sprovesti na atmosferskim uslovima ili u uslovima visokog vakuuma.

Tehnologija nanošenja brizganjem plazma prevlaka, pri normalnim atmosferskim uslovima okoline, poznat je u svetu pod nazivom „ATMOSPHERIC PLASMA SPRAYING“ (APS), odnosno plazma prskanje (brizganje) na atmosferi [6].

Metodologija nanošenja plazma prevlaka na delovima gasnih turbina propisana je od proizvođača, te se je mora striktno pridržavati.

TURBOMECA, kao jedan od proizvođača prahova i uređaja za nanošenje prevlaka putem plazme, propisao je svoju proceduru koja će biti izložena.

Za svaki deo GTM koji se regeneriše tehnologijom plazme neophodno je uraditi tehnološki postupak sa sledećim fazama i operacijama [7]: izbor praha za plazma prevlaku; tehnologija pripreme, nanošenja, obrade i kontrole plazme; sastavljanje GTM sa regenerisanim delovima; priprema (kalibracija) ispitne stanice za homologaciona ispitivanja i homologaciono ispitivanje GTM sa ugrađenim regenerisanim delovima, na Ispitnoj stanici.

Izbor praha za plazma prevlaku

Izbor praha, odnosno tipa prevlake početni je i najznačajniji korak koji zavisi od sledećih faktora ili njihove kombinacije:

- vrste osnovnog materijala i oblika dela;
- karakteristike željene prevlake (otpornost na habanje, koroziju, toplotu itd.);
- radnih uslova dela (pritisak, udar, temperatura, fluidi itd.);
- debljina prevlake;
- moguće tehnologije obrade prevlake;
- stanja površine nakon nanošenja prevlake (tvrdoća i površinska hrapavost).

Izbor praha, odnosno tipa prevlake jedna je od najvažnijih etapa u procesu nanošenja plazma prevlake, kako na nove delove tako i na delove koji su predviđeni za regeneraciju na GTM.

Prah se, pre upotrebe, mora prekontrolisati na prisustvo stranih prisusa i tragova vlage.

U svetu postoji više proizvođača prahova za nanošenje plazma metodom, pored ostalih: METCO, WELDSTEEL, LINCOLIN, LOCITE, UTP, BOHLER, BELZONA i METALOK.

VZ „Moma Stanojlović“ – Batajnica, koji veoma uspešno primenjuje navedenu tehnologiju u regeneraciji motora za helikoptere i avione koji se nalaze u naoružanju VS, prihvatio je standarde za nanošenje prevlaka plazma tehnologijom proizvođača TURBOMECA.

U tabeli 1 dat je, kao primer jedan broj praškova, a primer načelnog izbora prevlake dat je u tabeli 2.

Tabela 1 – Pregled prahova, koji se upotrebljavaju za plazma prevlake

Table 1 – Selection of powders used for plasma coatings

Red. br.	Naziv – oznaka praha	Trgovačka oznaka praha	Maks. radne temper.	Upotreba i namena prevlake
1	Nikl/aluminijum 5%	- 450 METCO - Amdru 956 Plazma – teknik	850°C	Višenamenska prevlaka. Služi kao podloga za nanošenje drugih prevlaka.
2	Hrom oksid	- 106 F METCO - Amdry 125 Plazma – teknik	540°C	Za prevlake otporne na habanje.
3	Hrom karbid Nikl / hrom	- 81 VF – NS METCO - Amdry 305 Plazma – teknik	815°C	Za prevlake otporne na visoke temperature i habanje.

Tabela 2 – Kriterijumi za izbor prevlake
Table 2 – Criteria for coating selection

Materijal na koji se nanosi prevlaka	Osnovna prevlaka (podsloj)	Završna prevlaka	Upotreba
Liveno gvožđe	Ni / Al 5 %		
		Ni / Al 5 %	
Ugljeni; ni I niskolegirani čelici	Ni / Al 5 %		Primenjuje se za velike debljine prevlake > 1 mm
		Ni / Al 5 %	
		Karbid–tungsten / Kobalt 12 ili 17 % Oksid hroma	Prevlake otporne na habanje
Čelici sa 13 % hroma I nerđajući čelici	Ni / Al 5 %		
	Ni / Al 20 %		
		Ni / Al 5 %	
		Karbid–tungsten / Kobalt 12 ili 17 %	Prevlake otporne na habanje
Legure titana		Oksid hroma	Prevlake otporne na habanje
		Ni / Al 20 % Karbid–tungsten / Kobalt 12 ili 17 %	Prevlake otporne na habanje

Tehnologija pripreme, nanošenja, obrade i kontrole plazme

a) Tehnologija pripreme i nanošenja prevlake na epruvetu

Osnovne tehnološke operacije su:

1. karakterizacija praha
 - fizičke, hemijske i mehaničke osobine praha,
 - kontrola kvaliteta praha (granulacija i vlaga);
2. izbor standardnih epruveta za mehanička i metalografska ispitivanja
 - definisanje broja standardnih epruveta;
3. izrada standardnih epruveta;
4. provera uređaja i sredstva za peskiranje (hrapavljenje);
5. izbor programa rada robota (za slučaj procesorskog upravljanja);
6. parametri nanošenja prevlake na epruvetu;
7. hrapavljenje epruvete;
8. nanošenje plazma prevlake na epruvetu;
9. kontrola kvaliteta plazma prevlake na epruvetama
 - debljina prevlake,
 - adhezija (prianjanje),
 - tvrdoća prevlake,
 - metalografske karakteristike (oksidi, poroznost, neistopljene čestice, unutrašnje prskotine, veza između prevlaka u više slojeva).

U slučaju dobijanja nezadovoljavajućih rezultata i kvaliteta prevlake na epruветama, moraju se kritički ispitati oprema, tehnologija rada i radni uslovi.

Nanošenje prevlake na deo koji se regeneriše ne sme početi dok se ne dobiju zadovoljavajući rezultati kvaliteta prevlake na epruветama.

b) Tehnologija pripreme i nanošenja prevlake na delu

Osnovne tehnološke operacije na delovima su:

1. priprema površine (pranje i odmaščivanje);
2. defektacija;
 - ispitivanje na prskotine (ferofluks, penetrat, rentgen, ultra- zvuk),
 - dimenzione kontrole sa proverom tolerancija oblika i položaja;
3. mašinska obrada pre plazmiranja;
4. kontrola dimenzije nakon mašinske obrade;
5. definisanje, konstruisanje i izrada alata (nosećih, maskirnih i kontrolnih);
6. zaštita (maskiranje) površina koje se ne peskiraju;
7. peskiranje (hrapavljenje) površina koje će se plazmirati;
8. zaštita (maskiranje) površina koje se ne plazmiraju;
9. provera programa plazmiranja na „hladno“;
10. nanošenje prevlake na pripremljeni deo, sa parametrima potvrđenim na epruветama;
11. dimenzione kontrole sa nanetom prevlakom;
12. definisanje metoda i tehnologije mašinske obrade;
13. kontrola tvrdoće i kvaliteta površine prevlake;
14. dimenziona kontrola.

U slučaju nezadovoljavajućeg kvaliteta nanete prevlake, neophodno je njeno uklanjanje i ponavljanje postupka nanošenja.

Pri izvođenju ovih radnji važno je uvek voditi računa o merama zaštite tokom rada, jer je ova tehnologija ekološki opasna i štetna po ljudsko zdravlje.

Sastavljanje GTM sa regenerisanim delovima

Posle završene regeneracije delova, a pre ugradnje u gasnu turbinu, mora se izvršiti merenje svih definisanih kota, na trokodinatnoj mašini za kontrolu.

Dobijene rezultate izmerenih kota, prema definisanim lokacijama, uneti u liste dimenzione kontrole delova GTM.

Priprema (kalibracija) ispitne stanice za homologaciona ispitivanja

Kalibracija ispitne stanice sprovodi se prema postojećoj dokumentaciji. Cilj kalibracije je provera svih mernih sistema na stanici, koji moraju biti u propisanim granicama tačnosti. Time se obezbeđuje tačnost izmerenih parametara tokom homologacionog ispitivanja na GTM.

Kalibracija ispitne stanice vrši se „Etalon“ GTM, a prema listama Protokola serijskog ispitivanja motora.

Protokol serijskog ispitivanja motora sastoji se od sledećih operacija:

- pripreme motora za ispitivanje;
- povezivanja motora na ispitni sto;
- provere sistema za kontrolu motora;
- kontrole vibracija bez opterećenja;
- postavljanja kočnice sa vodom i uhodavanje;
- snimanja statičke karakteristike za n_{kor} (o/min) P_{kor} (kW);
- proračuna i analize rezultata;
- kontrole vibracija sa opterećenjem;
- funkcionalne provere pri n_{iz} (o/min) P_{max} (kW);
- provere pojave pumpanja;
- skidanja kočnice i provere zaustavljanja motora;
- unutrašnje konzervacije;
- odvajanja instalacije i skidanja motora sa ispitnog stola;
- spoljašnje konzervacije i pakovanja.

Cilj kalibracije je pouzdana potvrda performansi motora sa ugrađenim regenerisanim delovima.

Homologaciono ispitivanje GTM sa ugrađenim regenerisanim delovima, na ispitnoj stanici

Ispitivanje motora na ispitnoj stanici izvodi se prema Protokolu serijskog ispitivanja. Po dobijanju zadovoljavajućih performansi motora, pri standardnom serijskom ispitivanju GTM, pristupa se 48-časovnom homologacionom ispitivanju po ciklusima.

Kroz ovo ispitivanje, koje je najvažniji deo homologacije, treba da se potvrdi kvalitet i pouzdanost regenerisanog dela u uslovima koji odgovaraju uslovima rada u eksploataciji.

Homologaciono ispitivanje motora u trajanju od 48 časova je nastavak serijskog ispitivanja motora i odvija se u 8 ciklusa. Predviđeno je da svaki ciklus traje 6 časova neprekidnog rada motora.

Struktura jednog ciklusa sa režimima i vremenima rada motora mora biti unapred definisana i propisana.

Nakon završetka svakog ciklusa, u neprekidnom trajanju od 6 časova, snima se karakteristika motora prema Listi ispitivanja iz Protokola ispitivanja motora.

Program homologacionog ispitivanja definiše se u zavisnosti od konstruktivne složenosti, roka rada i pouzdanosti delova sa prevlakom, kao i karakteristika prevlaka.

Najčešće se čuva jedan GTM specijalno za homologaciona ispitivanja regenerisanih delova i sprovedenih modifikacija.

Nakon odvajanja instalacija i skidanja motora sa ispitne stanice motor se upućuje na rastavljanje.

Rastavljanje motora sprovodi se do nivoa potrebnog da se skinu svi regenerisani delovi koji su bili na 48-časovnom homologacionom ispitivanju. Nakon pranja izvodi se dimenziona kontrola. Merenje se vrši po istom postupku kao što se vrši kod dimenzione kontrole delova pre homologacije.

Na kraju treba vizualno prekontrolisati stanje prevlake na regenerisanim delovima, na kojima se ne dozvoljavaju nikakve prskotine, promena boje ili ispupčenja na površinama sa prevlakom.

Zaključak

Održavanje brodskih GTM u pogonskoj spremnosti u sadašnjim uslovima veoma je otežano, uglavnom zbog nemogućnosti nabavke skupih rezervnih delova iz uvoza, a posebno za GTM starije proizvodnje.

Zbog toga je nužno proces održavanja usmeriti u pravcu regeneracije oštećenih i pohabanih delova GTM.

Jedna od najprihvatljivijih metoda regeneracije koja bi se mogla primeniti na delovima brodskih GTM jeste metoda metalizacije plazma postupkom.

Tehničke karakteristike prevlaka, dobijenih ovim postupkom, najbolje odgovaraju zahtevima koji proizlaze iz uslova rada delova GTM na brodovima.

Kao garancija uspešnosti primene plazma tehnologije na delovima brodskih GTM je vrlo uspešna primena ove tehnologije u vazduhoplovstvu na različitim tipovima pogonskih grupa, pri čemu se moraju ispoštovati specifični zahtevi u pogledu uslova rada brodskih GTM (npr. intenzivna korozija usled dejstva morske vode).

U remontnim ustanovama Ratne mornarice ova tehnologija se nije primenjivala u procesu održavanja GTM ugrađenih na brodovima.

Uvođenje tehnologije plazma prevlaka u regeneraciji delova GTM na brodovima može biti olakšano time što oprema za nanošenje prevlaka i verifikovani kadar sa potrebnim iskustvom postoje u vazduhoplovnim strukturama VS, tako da nisu potrebna nikakva ulaganja ni u eventualnu opremu niti u naknadno edukovanje kadra.

Da bi se ova tehnologija uspešno primenjivala, potrebno je uvođenje tehničke dijagnostike prema stanju u eksploataciji GTM, od kojih su od posebnog značaja endoskopija, vibraciona dijagnostika, parametarska dijagnostika i spektralna analiza ulja. Efekat primene ovakvog dijagnostičanog i regenerativnog sistema je produženje roka rada i napuštanje zastarelog sistema fiksnog roka rada (resursa), koji je danas na snazi.

Literatura

- [1] Mišović, D., *Regeneracija metalizacijom plazma – postupkom*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, Vol 41, No. 1, pp. 32–39, Ministarstvo odbrane Republike Srbije, Beograd, 1993.
- [2] Milić, B., *Što bi trebalo da svaki obrazovan čovek zna o fizici plazme?*, Društvo matematičara i fizičara Crne Gore i Društvo fizičara Srbije, 9. kongres fizičara Jugoslavije, Plenarna predavanja, Petrovac na Moru, 1995.
- [3] www.vecowelding.com.
- [4] *Tehnički opis i uputstvo za eksploataciju brodskog postrojenja s gasnom turbinom M8G*, SSNO, Beograd, 1982.
- [5] Rašuo, B., *Tehnologija gradnje letelica*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 1995.
- [6] *Turbomeca common techniques book*, jul 1981, mart 1983. godine, Procedure 430.
- [7] Janković, S., Jovanović, M., *Primena i verifikacija tehnologije plazma prevlaka na delovima gasoturbinskih motora*, VZ „Moma Stanojlović“ Batajnica.

POSSIBILITY TO REGENERATE PARTS OF SHIP GAS TURBINE ENGINES USING THE PLASMA METALLIZATION PROCESS

FIELD: Mechanical Engineering

ARTICLE TYPE: Professional Paper

Summary:

This paper presents the regeneration of parts of ship gas turbine engines by the plasma metallization process. One of the most modern metallization procedures is a plasma process, which has more advantages compared to other metallization procedures. This work will deal with metallization processes, i.e. the plasma-based metallization process and the possibility of applying this process to the regeneration of parts of ship gas turbine engines (GTEs).

Introduction

In modern conditions of maintenance of mechanical parts, components and technical material resources (TMS), there is a growing need to regenerate mechanically damaged and worn parts, since it significantly reduces the price of repairs and maintenance of TMSs.

Scientific achievements in the field of regeneration methods gave more technological solutions that enable the achievement of such results that the properties of regenerated parts surpass the characteristics of new parts, or at least maintain the quality of new ones.

Several regeneration methods are applied, depending on the type of material, shape, damage, constructive and technological characteristics of the damaged parts, working conditions and application of certain methods in the given circumstances. The most commonly used methods of regeneration are the following ones: welding and over-welding, hard chromium

plating, hot and cold metallization, use of technical metals, Metalock process, various bonding procedures, etc. This paper presents the plasma-metallization process and the possibilities to apply this process for the regeneration of parts of ship gas turbine engines (GTEs).

Metallization (spraying the surface of metals)

Metallization is a flame spraying process in which metal (or ceramic) coatings are used for coating surfaces during manufacturing processes to increase surface resistance to abrasion, heat and corrosion. The process of thermal spraying consists of heating metals (or non-metallic materials) and their injection in the atomized form onto the surface. Today there are more metallization procedures, some of which are common in industrial applications: wire metallization, electric arc metallization, metal powder coating, Diamond Jet metallization process and plasma-metallization process.

Plasma metallization process

One of the most modern procedures of metallization is the plasma process which has more advantages and specific characteristics compared to other procedures of metallization. The development of spray technology was needed to spray metal alloys that melt at temperatures of more than 15000 °C. This technical and technological requirement could only be achieved by the plasma procedure. Plasma gas is obtained by ionization using a high-voltage arc occurring between the anode and the cathode in the plasma gun. Hot plasma jet passes through the copper nozzle at high rate, then it is water cooled while at the same time metal powder used for coating is injected into the hot plasma gas where it is melted and deposited on the substrate.

The application of plasma technology coating on parts of ship gas turbine engines (GTEs)

Possibilities of applying plasma coatings to large parts of GTEs are wide. Protective coatings can be used on working blades, conductive blades, disks, labyrinth seals, mounts, bearings and parts of the body and the combustion chamber. Besides the above, a frequent application of plasma coatings is for maintaining the minimum clearance between the casing and the blades themselves, in turbines as well as in compressors. For each part of GTEs, regenerated by the plasma technology, it is necessary to perform a technological process with the following phases and operations: selection of powder for plasma coating; technology of plasma preparation, deposition, treatment and control; preparation of GTEs with regenerated areas; preparation (calibration) of test stations for testing and homologation, and homologation testing of GTEs with integrated regenerated parts at test stations.

Conclusion

One of the most acceptable methods of regeneration that could be applied to parts of the ship GTE is a method of plasma metallization process. Technical characteristics of the coating, obtained by this procedure, show the best matching with the requirements for GTE parts of ships.

A guarantee of the success of applying the plasma technology in the areas of ship GTEs can be a very successful application of this technology in the Air Force in various types of operating groups, while specific requirements must be met as to the conditions of ship GTEs (e.g. due to intense corrosion effects of sea water).

To make this technology successfully implemented, it is necessary to introduce technical diagnosis of the conditions of the exploitation of GTEs, some of which are of special importance such as endoscopy, vibration diagnostics, diagnostics and parametric spectral analysis of oils. The effect of such a diagnosis and regeneration is an extension of operational life and abandoning the outdated system of fixed operating lives of resources, which is now in force.

Key words: regeneration of parts, metallization, plasma process, coating.

Datum prijema članka: 21. 10. 2010.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 02. 02. 2011.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 03. 02. 2011.