



NESTABILNOSTI U PROCESU NITRIRANJA PULSIRAJUĆOM PLASMOM

Ivan POPOVIĆ, Miodrag ZLATANOVIĆ
Elektrotehnički fakultet, Beograd

Rezi me:

U radu je analizirana primena impulsnog napajanja kod sistema za površinsku obradu materijala kao što su procesi difuzije, depozicije, itd. Prikazana su poboljšanja dobijena ovakvim načinom napajanja u kontroli parametara procesa i karakteristika površine materijala u odnosu na klasični DC sistem napajanja. Posebna pažnja u radu je posvećena analizi nestabilnosti gasnog pražnjenja koja se ogleda u pojavi lučnog i gustog pražnjenja^[1]. Date su osnovne karakteristike sistema za detekciju pojave lukova, i oblici naponskih i strujnih signala u prisustvu nestabilnosti. Takođe je analiziran uticaj odnosa impuls pauza i učestanosti generisanog napona plazma generatora na stabilnost i efikasnost odvijanja procesa depozicije^[2]. Pokazano je da se kontrolom odnosa impuls pauza može izvršiti kontrola nestabilnosti gasnog pražnjenja, kao i da se analizom električnih karakteristika nestabilnosti mogu dobiti podaci o vrsti i sastavu radnog gasa u sistemu.

S u m m a r y

In this paper hydrogen and nitrogen glow discharge response to the applied pulse voltages of different frequencies and duty cycles was investigated in order to analyze instabilities after the discharge ignition, the glow-to-arc transition and properties of arc suppression system. The results have shown that pulse biasing gives the opportunity to control and avoid damage of cathode surface due to the arcing processes by simple control of pulse biasing parameters such as duty cycle and frequency.

1. UVOD

Razvojem impulsnih plazma generatora ostvaren je veliki napredak u procesima površinske obrade materijala u odnosu na standardni DC način napajanja. Uveden je veliki broj parametara čijom kontrolom se mogu postići mnoge kvalitativne prednosti u načinu vođenja procesa. Jedna od osnovnih prednosti impulsnog napona ogleda se između ostalog i u postojanju kontrole raspodele temperature uzoraka podešavanjem odnosa signal pauza generisanog napona kao i u mogućnosti kontrole pojave lukova i gustog tinjavog pražnjenja u procesima nitriranja kompleksnih objekata [1]. Na taj način napravljen je veliki napredak u održavanju stabilnosti procesa. [2][3]

Frekvencija impulsnih plazma generatora se kreće od DC do 500kHz, pri čemu impulsi mogu

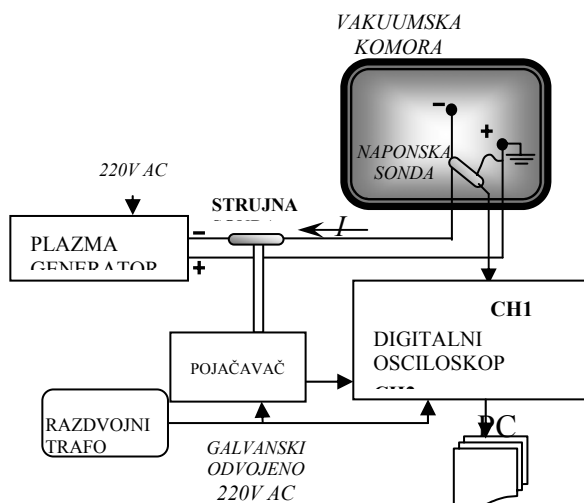
biti unipolarni ili bipolarni. U našem slučaju korišćen je unipolarni impulsni generator JONPLUS snage 20kVA, učestanosti 90Hz do 20kHz i sa podešavanjem odnosa signal pauza od 5 do 96%.

U radu su analizirane pojave nestabilnosti gasnog pražnjenja u pogledu načina pojavljivanja, učestanosti i intenziteta i date su metode za njihovu detekciju i prevenciju. [4]

2. OPIS MERNOG SISTEMA

U cilju analize električnih karakteristika nestabilnosti gasnog pražnjenja na željenom pritisku gasa u sistemu i sa podešenim parametrima generatora (učestanosti i odnos impuls pauza) pomoću akvizicionog sistema (slika 1) vršena su snimanja vremenskih oblika naponskih i strujnih signala. Pre početka eksperimenta komora je

evakuisana do pritiska od 1Pa i zatim ispunjena radnim gasom koji je u našim eksperimentima bio vodonik ili azot, odnosno vazduh. Kontrola pritiska u sistemu je vršena preko kontrole protoka radnog gasa i brzine ispušavanja pumpe. Vršena su i merenja temperature katode, ukupne površine od 600cm^2 , pomoću termopara. Nominalna vrednost stuje je u svakom trenutku zavisila od pritiska u sistemu, primenjenog napona napajanja i vrste radnog gasa.



Slika 1 Šema veza mernog sistema

Na slici 1. data je blok šema sistema za merenje vremenskih oblika naponskih i strujnih signala. Kako je frekventnost pojava nestabilnosti znatno veća kod procesa napajanih DC generatorom, vrednost odnosa impuls pauza impulsnog generatora postavljena je na nominalnu vrednost od 96% kako bi oblik signala bio najpribližniji standardnom DC signalu, a samim tim i učestalost pojava nestabilnosti bila veća.

3. OBlici NESTABILNOSTI GASNOG PRAŽNENJA

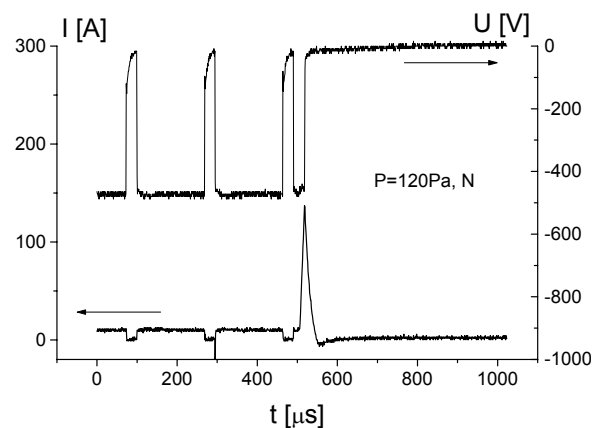
U procesu površinske obrade materijala detektovane su pojave različitih tipova nestabilnosti koji su posledica kako fizičkih parametara procesa kao što su pritisak gasa u sistemu, temperatura uzorka (katode), tako i parametra impulsnog generatora, hemijskog sastava radnog gasa i same geometrije uzorka.

Obzirom da se radi o štetnim pojavama koje mogu dovesti do lokalnog pregrevanja uzorka i njegovog oštećenja analizirane su i karakteristike sistema za detekciju pojava nestabilnosti koji bi, nezavisno od tipa nestabilnosti, trebalo da spreči nekontrolisan razvoj nestabilnosti u lučno praž-

njenje. U tom cilju razmatrane su statičke i dinamičke karakteristike sistema za detekciju nestabilnosti kao i uticaj parametara samog impulsnog plazma generatora na učestanost pojava nestabilnosti gasnog pražnjenja.

Pri procesu površinske obrade materijala u plazmi jedan od najštetnijih oblika nestabilnosti jeste lučno pražnjenje. Pri pojavi takvog oblika nestabilnosti ukupna energija u sistemu predaje se lučnom pražnjenju koje je skoncentrisano na malu površinu katode i dovodi do lokalnog pregrevanja uzorka i trajne promene njegove strukture na mestu pregrevanja. Na taj način fizički se oštećuje površina uzorka (šarže) čija cena u pojedinim slučajevima prevazilazi cenu samog uređaja (kada se vrši obrada masivnih alata složene geometrije). Svaka pojava lučnog pražnjenja neće dovesti do pojave oštećenja uzorka, već u zavisnosti od brzine reakcije sistema za detekciju nestabilnosti, lučnom pražnjenju će biti predana energija veća ili manja od kritične energije za formiranje trajnih oštećenja. Vreme detekcije i reakcije je najbitniji parametar sistema za detekciju nestabilnosti.

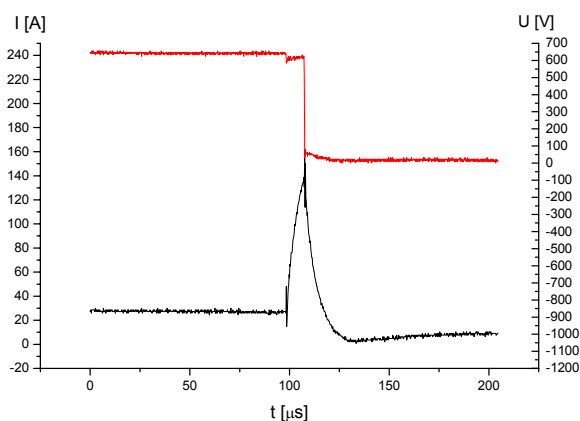
Karakteristični oblik naponskih i strujnih signala u prisutvu lučnog pražnjenja u sistemu gde je kao radni gas korišćen azot na pritisku od 120Pa prikazan je na slici 2.



Slika 2 Oblici naponskih i strujnih signala u prisustvu lukova u plazmi

Može se videti da napon napajanja ima gotovo pravougaoni oblik i da se pri pojavi pražnjenja javlja zanemarljiv pad napona. Apsolutni pritisak u sistemu odgovara maloj stuji pražnjena i velikoj impedansi plazme [5]. Vidi se da je do pojave luka došlo $15\mu\text{s}$ posle pojave naponskog impulsa što je uslovalo vidljiv pad napona. Posle $11\mu\text{s}$ senzor pojave lukova je prekinuo napajanje. Energija akumulirana u sistemu i izvoru za napajanje predana je lučnom pražnjenju u toku vremenskog intervala od $48\mu\text{s}$. Ova energija može oštetiti katodu ukoliko je koncentrisana na malu površinu [6].

Na slici 3 dat je izgled naponskih i strujnih signala u prisustvu luka. Vidi se da je brzina rasta struje od $20\text{A}/\mu\text{s}$ dovoljna da odreaguje senzor za detekciju luka. Vreme reakcije sistema je veoma značajno, jer usled velike brzine rasta, struja već posle $8\mu\text{s}$ dostiže vrednost od 150A . U nekim slučajevima pojave luka vrednost struje u piknu može premašiti i 250A . Zbog toga je značajno da vreme od pojave do detekcije luka i gašenja napajanja bude što kraće kako bi vrednost struje u piknu bila što manja, a samim tim i ukupna energija predata lučnom pražnjenju.

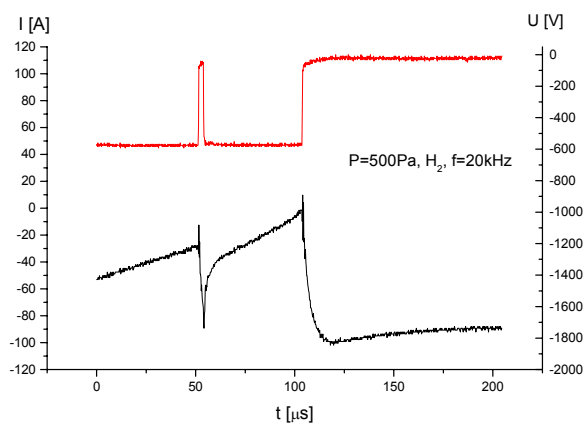


Slika 3 Prikaz razvoja nestabilnosti gasnog pražnjenja u lučno pražnjenje

Pošto se koristi impulsno napajanje koje obavlja i ulogu prevencije pojave lučnog pražnjenja, svaka nestabilnost u sistemu ne treba biti okarakterisana kao lučno pražnjenje. Posle detekcije lučnog pražnjenja napajanje sistema se gasi na određeni vremenski period kako bi došlo do relaksacije sistema, čime se unose pauze u vođenje procesa čime se smanjuju efikasnost i brzina procesa. Stoga je postavljanje konkretnih vrednosti strujnog praga i praga brzine rasta struje treba da bude kompromisna vrednost koja obezbeđuje da vrednost energije predate lučnom pražnjenju bude manja od kritične vrednosti koja dovodi do pojave trajnih oštećenja površine uzorka. Vidi se da su dinamičke karakteristike kola za detekciju luka podjednako važne za uspešnu detekciju lučnog pražnjenja kao i statičke.

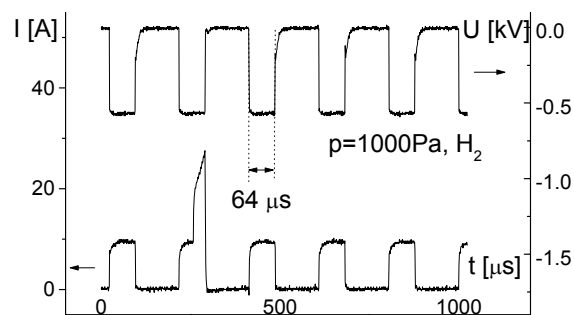
Pored nestabilnosti gasnog pražnjenja u vidu lučnog pražnjenja javlja se i gusto pražnjenje. Ono se javlja kao posledica geometrije katode i parametara procesa. Na slici 4 dati su vremenski oblici strujnih i naponskih signala u slučaju gustog pražnjenja. Gusto pražnjenje se manifestuje kroz značajno manju brzinu rasta struje od $1\text{A}/\mu\text{s}$ u odnosu na lučno pražnjenje. Kako je pojava pražnjenja u šupljini katode lokalizovana i

izolovana, pri prekidu napajanja proces pražnjenja se nastavlja i posle prekida napajanja. Po ponovnom uspostavljanju napajanja vrednost struje je slična kao i u trenutku prestanka napajanja. Na taj način gusto pražnjenje postepeno dostiže vrednost strujnog praga i kolo za detekciju lukova registruje pojavu nestabilnosti i gasi napajanje. Ukoliko ne bi postojala ovakva zaštita došlo bi do postepenog povećanja struje do maksimalne vrednosti određene snagom plazma generatora. To bi dovelo do pregrevanja uzorka i njegovog trajnog oštećenja.



Slika 4 Oblici naponskih i strujnih signala za slučaj gustog pražnjenja

Vremenska zavisnost naponskih i strujnih signala pri normalnom radu u prisustvu nestabilnosti gasnog pražnjenja data je na slici 5. Snimanja su vršena pri plazma procesu na pritisku od 1000Pa sa radnim gasom vodonikom. Sa slike 5. se vidi da, iako je došlo do nestabilnosti gasnog pražnjenja, nije došlo do pojave luka, jer vremenski interval od $64\mu\text{s}$ (vreme trajanja impulsa) nije bio dovoljan da se nestabilnost razvije u lučno pražnjenje.



Slika 5 Vremenska zavisnost napona i struje u prisustvu nestabilnosti

Sistem za detekciju pojave luka nije odreoovao, jer je zahvaljujući impulsnom napajanju izbegnut razvoj nestabilnosti u luk. Pri ovome sistem nije

detektovao da je struja pražnjenja premašila nivo praga. Takođe brzina promene struje od $1A/\mu s$ nije bila dovoljna da se ovaj oblik nestabilnosti okarakterise kao pojava luka. Sistem je po pojavi nestabilnosti nastavio rad u normalnom režimu već u sledećoj periodu naponskog signala.

Na ovaj način je pokazano da se kontrolom širine impulsa plazma generatora može postići potpuno ili delimično smanjenje pojave lučnog pražnjenja u plazmi. Ovo se može postići upravljanjem odnosa impuls pauza i podešavanjem učestanosti plazma generatora. Međutim treba imati u vidu da se smanjenjem širine impulsa smanjuje srednja snaga, a samim tim i brzina i efikasnost procesa obrade materijala.

Kako oblik i veličina strujnih impulsa zavise od pritiska u sistemu i prisustva nečistoća na površini katode, vrednost odnosa impuls pauza se bira kompromisno između stabilnosti i efikasnosti rada sistema.

4. ANALIZA PARAMETARA NESTABILNOSTI

U cilju karakterizacije pojave lukova i određivanja parametara procesa koja utiču na oblik nestabilnosti gasnog pražnjenja vršeno je određivanje energije predate lučnom pražnjenju za različite gasove pri istim parametrima procesa.

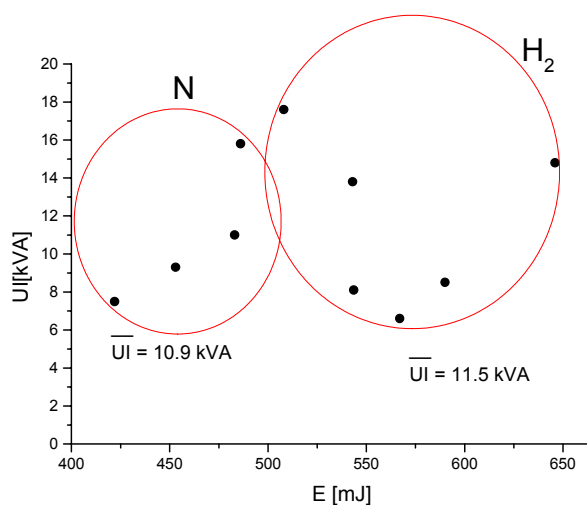
Za radne gasove azot i vodonik snimljeni su električni signali u prisustvu lukova na istom radnom pritisku i temperaturi u komori. Na osnovu električnih signala izvršen je proračun trenutne snage pre pojave luka kao i ukupne energije koju sistem predaje lučnom pražnjenju. Vrednost ukupne energije sistema predate lučnom pražnjenju je jedan od najbitnijih parametara analize jer predstavlja veličinu energije koja je skoncentrisana na maloj površini katode (uzorka) i koja dovodi do oštećenja katode.

Na slici 6 data je zavisnost trenutne snage pre pojave luka od energije sistema predate lučnom pražnjenju za radne gasove azot i vodonik.

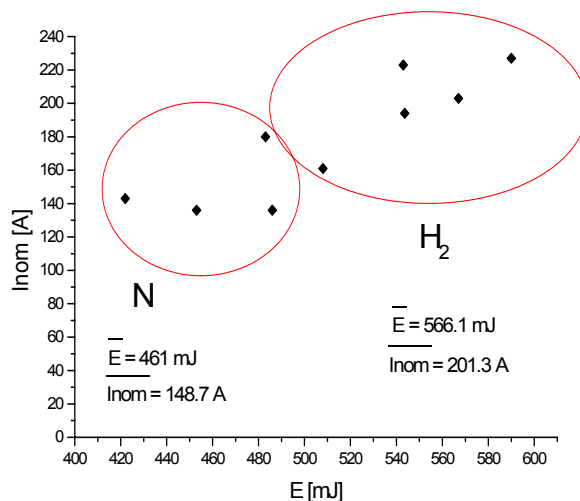
Sa slike 6. se vidi da za različite gasove pri istim trenutnim snagama pre pojave luka imamo različite vrednosti energije predate lučnom pražnjenju. Dakle za iste trenutne uslove pre pojave nestabilnosti imamo različit intenzitet nestabilnosti za različite gasove, odnosno, lučno pražnjenje u gasu je inenzivnije u slučaju kada se u sistemu koristi radni gas vodonik.

Na slici 7. data je zavisnost nominalne struje pri pojavi luka od energije sistema predate lučnom pražnjenju.

Sa slike 7 se vidi da su vrednosti nominalne struje luka za gas vodonik veće kod vodonika pri istim uslovima u sistemu pre pojave luka, što potvrđuje ranije pomenutu pretpostavku.



Slika 6. Zavisnost trenutne snage pre pojave luka od energije luka za radne gasove azot i vodonik



Slika 7. Zavisnost nominalne struje pri pojavi luka od energije luka za gasove azot i vodonik

Na osnovu dodatnih analiza oblika električnih signala utvrđeno je da vreme trajanja luka ne zavisi od energije luka kao ni od vrste gasa, već je oblik signala sličan u slučaju proboja u gasovima azotu i vodoniku. Postoji tendencija kod oba gasa koja pokazuje da manje trajanje lučnog pražnjenja ne znači i manji inenzitet pražnjenja ali se generalni zaključak ne može doneti obzirom da na oblike signala utiču i dinamičke karakteristike sistema za detekciju luka.

5. ZAKLJUČAK

Pri procesima površinske obrade materijala u plazmi neizostavno dolazi do štetnih pojava nestabilnosti.

bilnosti gasnog pražnjena koji su više izraženi u ranim fazama procesa kada je veće prisustvo nečistoća u sistemu. Korišćenjem impulsne plazme smanjena je učestanost ove pojave i omogućena lakša kontrola stabilnosti procesa putem podešavanja odnosa impulsa i pauze i frekvencije plazma generatora.

Sistem za detekciju pojave nestabilnosti mora imati zaštitu u vidu detekcije prelaska nivoa strujnog praga i brzine rasta struje kako bi se uspešno detektovale pojave lučnog i gustog pražnjenja.

Podešavanjem parametara plazma generatora i sistema za detekciju nestabilnosti može se znatno smanjiti pojava lučnog pražnjenja i izbeći oštećenje radne površine uzoraka.

Sastav i vrsta radnog gasa takođe utiču na vrednost akumulisane energije sistema predate lučnom pražnjenju, dok trenutna snaga sistema pre pojave luka ne utiče na njenu vrednost. Takođe je potvrđeno da je nominalna vrednost struje luka znatno veća kod vodonika u odnosu na azot, dok su vremena trajanja luka približno ista za oba gasa.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je delimično rezultat projekta Ministarstva za nauku i tehnologije Republike Srbije MIS.3.02.0174.B. Autori zahvaljuju dipl. ing. Bukorović Branislavu za akviziciju podataka koji se odnose na snimanje naponskih i strujnih karakteristika.

LITERATURA

- [1] M. Zlatanović, I. Popović, "Analiza električnih karakteristika nestabilnosti gasnog pražnjnja", ETRAN'03, (2003)
- [2] Popović, Ž. Đurišić, "Karakteristike nestabilnosti gasnog pražnjenja pri impuslnom napajanju", PSMN'02, III/1, (2002)
- [3] M. Zlatanović, I. Popović, A. Zlatanović, "Glow discharge response to D.C. pulse biasing", SPIG'02 (2002)
- [4] M. Zlatanović, Proceedings. of 7th Yugoslav Tribology Conf. YUTRIB'01, p 7-39-7-44 (2001)
- [5] Sellers, "The ennobling technology for reactive PVD", TECHNOTES, ENI,, (2001)
- [6] JT. A. Beer, J. Laimer and H. Stori, Surface & Coatings Technology, Vol. 116-119, p 1016-1023, (1999)