

## ВЛИЯНИЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА РЕЖИМА ВЪРХУ СТАБИЛНОСТТА НА РАБОТА НА ПЛАЗМОТРОН С ИНДИРЕКТНА ДЪГА

Ивайло Неделчев, Христо Скулев, Росен Василев

**Abstract:** An observation of the influence over electric arc stability of plasma sprayed coating is done. In this research the basic parameters are varied according different technological modes of the plasma spray coating equipment. The most important factors of electric arc stability were found. The form of the output voltage during variation of the: gas flow, current, flow coating material is observed. The report shows the influence of the technological parameters over the spectrum of the output voltage.

**Key words:** flow rate, electric arc stability, plasma coating

### ВЪВЕДЕНИЕ

Плазмено-праховото напластяване е един от авангардните методи за получаването на качествени покрития на основата на различни метални, композитни или керамични материали. Електрическата дъга необходима за получаването на плазмата, е силно зависима от някои основни параметри на режима: състав и дебит на плазмообразуващите и транспортните газове, дебит на праха за напластяване, напрежение и ток на дъгата и други. Промяната на един от горните параметри в някои случаи води до резки промени на енергиините характеристики на плазмотрона, а от там и до промяна на качеството на напластените покрития.

Особено важно е да се установи оптималната работна точка на апаратурата за напластяване, за всеки един от режимите на работа, при който се получават покрития с необходимите якостни параметри: твърдост, якост на сцепление, износоустойчивост и др. Качествени покрития биха се получили ако скоростта на генериране на плазмената струя е стабилна, което става при нисък коефициент на пулсации на изходното напрежение на плазмотрона [1-3]. Следователно, мярката за устойчива работа и повторямост на процеса на напластяване е стабилността на напрежението на електрическата дъга [4]. Наличието на стабилна във времето дъга с малки флукуации в камерата на плазмотрона, води до равномерни дебелини на покритията с константни якостни характеристики по цялата

площ на покритието. Същевременно ниското ниво на флукуации намалява смущенията генерирани от електрическата дъга в захранващата мрежа и така се подобрява електромагнитната съвместимост [4,5].

Плазмотроните са устройства консумиращи значителни количества електрическа енергия. От икономическа гледна точка за ефективността на процеса, важен параметър е използваната мощност за генериране на дъгата, а от там и на плазмената струя. Намаляването на мощността отделена в крайното стъпало на токоизточника, който е тип изправител, за захранване на плазмотрона, води до значително намаляване себестойността на праховото напластяване [5].

Възникват два основни проблема:

1. Установяване на влиянието на основните неелектрически параметри на режима върху стабилността на електрическата дъга, респективно върху формата на изходното напрежение.

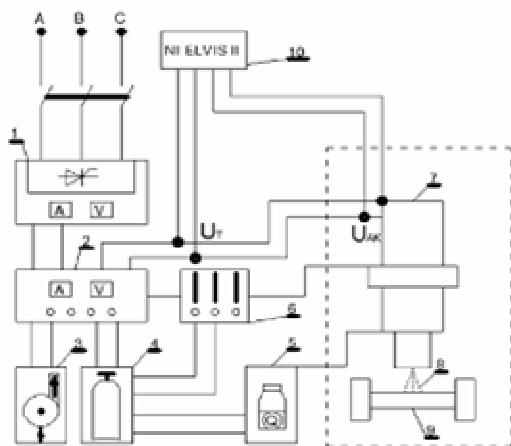
2. Влиянието на плазмообразуващите газове върху консумираната от плазмотрона електрическа мощност.

Настоящия доклад представя едно решение на горните проблеми, като се използват възможностите на съвременните измервателни системи. Същевременно той е част от по-обширно обследване с цел измерване, контрол и оптимизация на процесите при плазмотроните с индиректна дъга.

## 2. ИЗМЕРВТЕЛНА УСТАНОВКА И ПЛАНИРАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТА

Настоящото изследване е извършено на апаратура АПН-50 (фиг.1) с максимална мощност 50кW. За да се установи състоянието на електрическата дъга и влиянието на различни неелектрически параметри на режима, е необходимо да бъде снето в реално време напрежението между анода и катода -  $U_{AK}$  на плазмотрона, както и напрежението на изхода на захранващия тиристорен изправител -  $U_T$ . За целта се използва измервателната платформа NI ELVIS II с добавени към нея делители на напрежение (1:100) [6]. Използвани са два от аналоговите канали на платформата, като са настроени за приемане на диференциален сигнал (фиг.1) и честота на дискретизация  $f_s=100kHz$ . Следователно горната гранична честота на измервания сигнал може да достигне до:  $f_h=f_s/2=50kHz$ .

Изследвани са различни режими на работа на плазмотрон за прахово напластяване с индиректна дъга. Измерванията са направени с два основни плазмообразуващи газа (аргон и азот), като се променят техните пропорции и общото количество на плазмообразуващия газ. Вариациите на режимите включват и наличието или отсъствието на транспортен газ и прах за напластяване. Същевременно се записва формата на изходното напрежение при три основни токови натоварвания. Като транспортен газ е използван Ar.



**Фиг.1** Апаратура за плазмено напластяване АПН-50 с включена към нея измервателна система – NI ELVIS II. 1-токоизточник; 2-блок за управление; 3-охлаждаща система; 4-

газо-захранваща система; 5- прахоподаваща система; 6- газоразпределителна система; 7- плазмотрон ПН-50; 8- плазмена дъга; 9- образец; 10- измервателна система NI ELVIS II.

Основните неелектрически параметри на режима, които се променят са:

- дебит на аргона –  $Q_{AR}$  (l/min)
- дебит на азота –  $Q_N$  (l/min)
- дебит на аргона като транспортен газ –  $Q_{ART}$  (l/min)
- дебит на праха за напластяване –  $Q_{Ni}$  (g/h)

Основните електрически параметри, които се следят или записват от системата са:

- ефективна стойност на работния ток на тиристорния изправител –  $I$  (A).
- осцилограма на напрежението анод-катод на плазмотрона –  $U_{AK}$  (V).
- осцилограма на изходното напрежение на тиристорния изправител –  $U_T$  (V).
- спектър на напреженията -  $U_{AK}$  и  $U_T$ .

С оглед ограничаване броя на планираните експерименти и оптимизация, се налага предварителен анализ на избора на режимните параметри за вариация и степента на тяхното изменение.

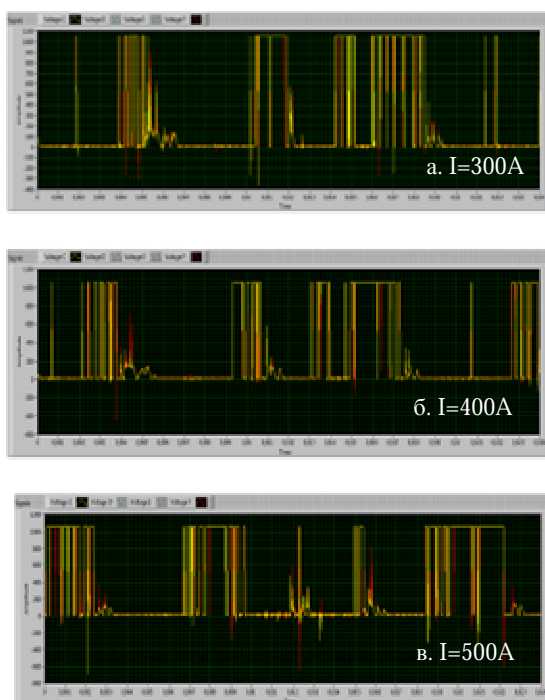
По паспортни данни използваният токоизточник има диапазон на изходния ток на изправителя от 200А до 600А ефективна стойност. От практическа гледна точка най-целесъобразно се оказва да се работи в диапазона 300А-500А. Затова експериментите са извършени при три различни токови режима, съвпадащи с границите и средата на посочения диапазон, а именно 300А, 400А и 500А.

По отношение на използваните плазмообразуващи газове от най-често използваните кислород, водород, азот, въглероден двуокис, хелий, аргон, по предварителни данни [5] е установено, че покрития с най-добри якостни параметри (за използвания прах на никелова основа), се получават при комбинацията на аргон и азот като плазмообразуващи газове. На практика за изследвания плазмотрон дебита на плазмообразуващ газ –  $Q$ , е от 10-40 l/min, като най-добра е комбинацията от 20 l/min аргон и от 0 до 4 l/min азот [5]. Прахът за напластяване се променя от 0 до 800 g/h.

### 3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

#### 3.1 Изследване влиянието на работния ток върху формата на напрежението $U_{AK}$ и напрежението на токоизточника $U_T$ .

Проведените изследвания показват, че формата на изходното напрежение с нарастване на тока се запазва. Тя се състои от пакети стръмни импулси с различна продължителност, и паузи между тях (фиг.2 а,б,в). С увеличаване на работния ток се намаляват паузите между пакетите импулси, като същевременно се увеличава тяхната продължителност, което съответства на по-голяма ефективната стойност на напрежението върху плазмотрона. Графиките са снети при липса на транспортен газ и прах за напластяване.



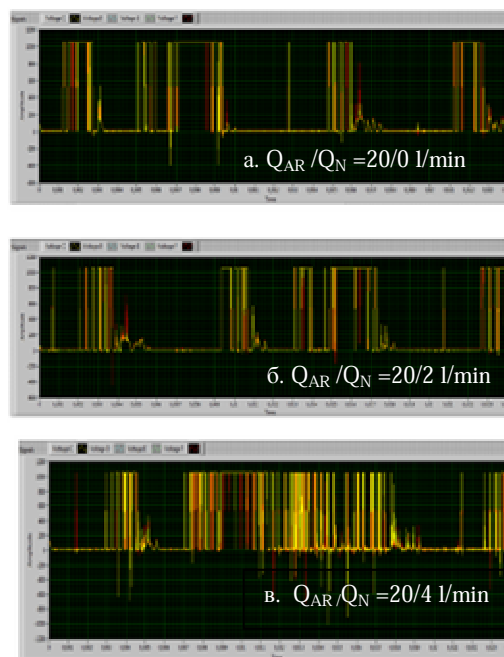
**Фиг.2** Влияние на силата на работния ток върху стабилността на процеса, при дебит на плазмообразуващите газове:  $Q_{AR}/Q_N = 20/2$  (l/min).

От графиките може да се види, че с нарастване на тока стабилността на дъгата не се променя т.е. формата на напрежението е еднаква и при трите режима.

#### 3.2 Изследване влиянието на плазмообразуващите газове.

Измерена е формата на изходните напрежения при три различни пропорции на плазмообразуващите газове:  $Q_{AR}/Q_N = 20/0$

l/min;  $Q_{AR}/Q_N = 20/2$  l/min;  $Q_{AR}/Q_N = 20/4$  l/min. (фиг.3 а,б,в). Проведения експеримент е без наличието на транспортен газ и прах за напластяване.



**Фиг.3** Влияние на разхода на плазмообразуващите газове върху стабилността на процеса при сила на работния ток 400A и плазмообразуващите газове  $Q_{AR}/Q_N$ .

С добавянето на малки количества азот в плазмообразуващата смес, се запазва характерът на изменение на изходното напрежение (пакети от стръмни импулси), но силно нараства консумираната мощност от плазмотрона, поради лесната йонизация на азота. Това се изразява в сгъстяване на импулсите във времедиagramата.

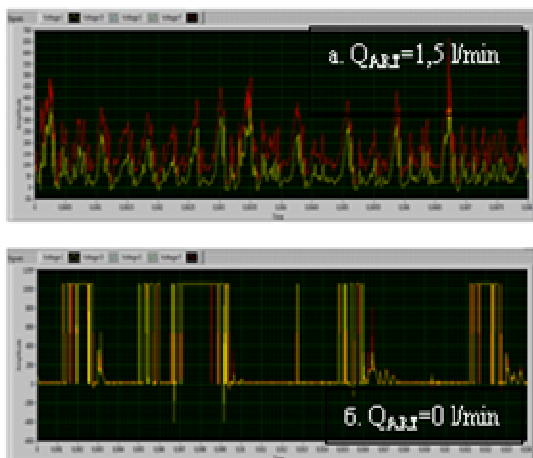
#### 3.3 Изследване влиянието на транспортния газ.

Добавянето на транспортен газ става близо до края на дюзата в плазмотрона, което предполага силно влияние върху характера на изменение на изходното напрежение, поради прякото въздействие на газовия поток върху дъгата. Получените данни от експеримента потвърдиха тази хипотеза. (фиг.4а,б).

Експеримента бе проведен при следния технологичен режим:

- работен ток  $I=400A$
- дебит на аргона  $Q_{AR}=20$  l/min
- дебит на азота  $Q_N=2$  l/min

- без прах за напластяване
- дебит на транспортен газ аргон  $Q_{AR}=0 - 1,5 \text{ l/min}$ .



**Фиг.4** Влияние на разхода на транспортния газ върху стабилността на процеса при силата на работния ток 400А и дебит на плазмообразуващите газове  $Q_{AR}/ Q_N = 20/2 \text{ l/min}$ .

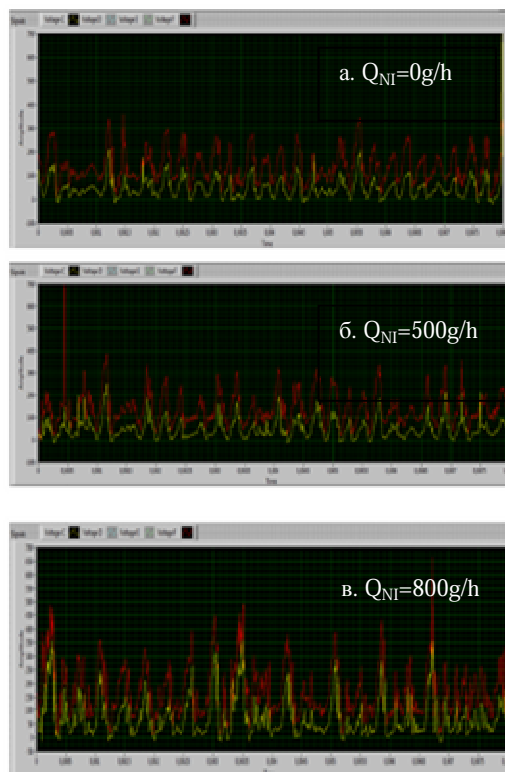
Добавянето на транспортен газ променя характера на изходното напрежение на дъгата. Импулсите са с по-малка стръмност и се наблюдава определена цикличност във времедиagramата за разлика от режима без транспортен газ, където такава липсва. Наблюдава се намаляване на нивото на флукуациите, а следователно и подобряване на стабилността на дъгата.

### 3.4 Изследване влиянието на количеството прах за напластяване върху стабилността на процеса.

За да бъде определено влиянието на количеството прах за напластяване върху стабилността на процеса, бе проведен и следващия експеримент. При идентичен технологичен режим посочен в т.3.3, в плазмотрона се въвежда прах на никелова основа с дебит  $Q_{Ni}=500\text{g/h}$  и  $Q_{Ni}=800\text{g/h}$ . Получените графични данни за стабилността на процеса са представени на фиг.5а,б,в.

С нарастване на дебита на прахоподаването от 0 до 800 g/h, чувствително намалява средното ниво на импулсите на напрежението, респективно и тяхната стръмност. От което следва, че добавянето на прах за напластяване, в изследваните граници, намалява флукуациите на дъгата и стабилизира процеса. Това вероятно се дължи

на поглъщането на енергия, от дъгата, респективно от плазмената струя, необходима за нагриването, частичното разтопяването и транспортиране на праха до основата за напластяване.

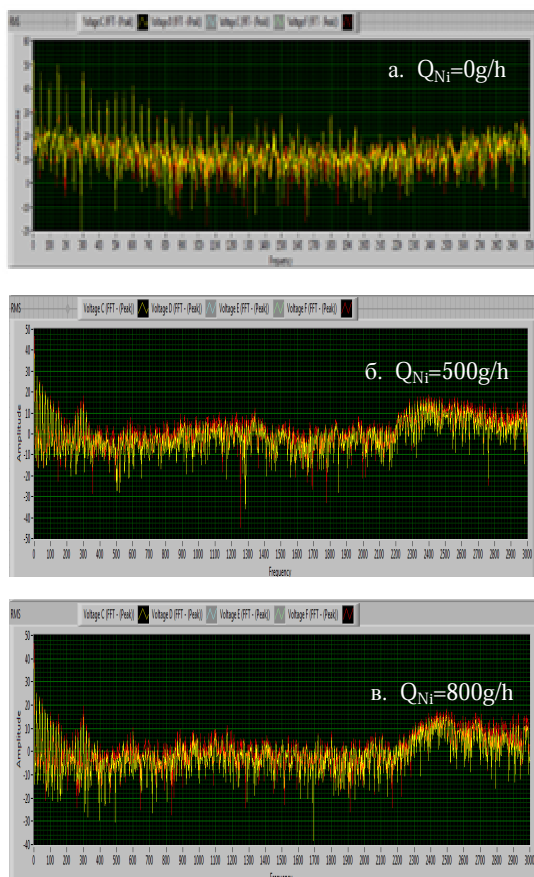


**Фиг.5** Влияние на разхода на праха за напластяване върху стабилността на процеса при сила на работния ток 400А, дебит на плазмообразуващите газове  $Q_{AR}/ Q_N = 20/2 \text{ l/min}$  и транспортен газ с дебит  $Q_{ART}=1,5\text{l/min}$ .

### 3.5 Изследване влиянието на прахоподаването върху честотния спектър на изходните напрежения.

С промяната на формата на изходните напрежения, се изменя широчината, а също и характера на честотния им спектър. За да има сравняемост на резултатите, експеримента бе проведен с технологичен режим посочен в т.3.4. Опитните данни (фиг.6а,б,в) сочат, че с добавяне на прах за напластяване и увеличаване на дебита му, се стеснява спектъра в посока на ниските честоти.

При режимите с наличие на прах за напластяване се забелязва и силно изразени максимуми в диапазона 2,3kHz-3kHz, които са генерирани от цикличността на пулсациите в изходното напрежение (фиг.5б,в).



**Фиг.6** Влияние на разхода на праха за напластяване върху честотния спектър на изходните напрежения. при сила на работния ток 400А, дебит на плазмообразуващите газове  $Q_{AR}/Q_N=20/2l/min$  и транспортен газ с дебит  $Q_{ART}=1,5l/min$

#### 4. ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Извършено е изследване с цел установяване влиянието на технологичните параметри на режима върху стабилността на работа на плазмотрон с индиректна дъга. Изследванията се отнасят конкретно за апаратура за плазмено напластяване тип АПН-50.

От получените резултати и направения анализ, могат да се формулират следните изводи:

1. Изменението на работният ток в диапазона от 300 до 500 А не оказва съществено влияние върху стабилността на процеса на работа на плазмотрона.

2. Съществено влияние върху формата на осцилограмите оказва наличието на транспортен газ, дори и в малки количества до 1,5 l/min, както и количеството на праха, от 500 до 800 g/h. Увеличаването на дебита на праха за напластяване стеснява спектъра на изследваните напрежения.

3. Наличието на азот, от 2 до 4 l/min, в плазмо-образуващата смес, оказва съществено въздействие върху продължителността на пулсациите на изходното напрежение.

#### Литература:

- [1] Hamidreza S. Jazi. Advanced plasma spray applications, INTECH 2012;
- [2] Christopher C. Berndt, Sqnjay Sampath, Thermal spray industrial applications, ASM International, 1994;
- [3] Жуков М., теория термической электродуговой плазме, Новосибирск, Наука, м1987;
- [4] Р. Fauchais, A. Vardele Solution and suspensions plasma spraying of nanostructure coating, INTECH 2012;
- [5] Христо Скулев, Дисертационна работа на тема " Изследване на процеса плазмено-дъгово напластяване с прахове на никелова основа" 2003г.
- [6] Росен Василев, Ивайло Неделчев, Вяра Василева, Мирослава Донева, Приложение на NI ELVIS II при определяне показателите на качеството на електрическата енергия, Метрология 2009г.

#### За контакти:

9010 Варна, ул. “Студентска” 1  
 Технически университет -Варна  
 гл.ас.инж. Ивайло Неделчев,  
 e-mail:[iynedelchev@abv.bg](mailto:iynedelchev@abv.bg),  
 доц. д-р инж. Христо Скулев,  
 e-mail:[skulev@tu-varna.bg](mailto:skulev@tu-varna.bg)  
 доц. д-р инж.Росен Василев,  
 e-mail:[rsnvasilev@abv.bg](mailto:rsnvasilev@abv.bg)