

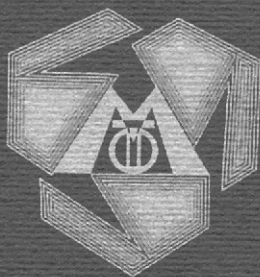


ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ

## СБОРНИК ДОКЛАДИ

25 ЮБИЛЕЙНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ  
С МЕЖДУНАРОДНО УЧАСТИЕ  
МТФ' 2007

62 ГОДИНИ  
МАШИННО-ТЕХНОЛОГИЧЕН  
ФАКУЛТЕТ



Том I

14-16 Септември, 2007  
Созопол



Dobre Runčev, Lutz Dorn Gas shielded metal arc brazing of surface zinc coated thin steel sheets	183
Теофил Ямболиев, Георги Минчев Моделиране на температурното поле при дифузионно заваряване на хромова стомана	189
Петко Кънчев Дефект при заваряване	195
<b>ИЗПИТВАНЕ НА МАТЕРИАЛИТЕ</b>	199
Спилко Хубенов, Рангел Рангелов, Крум Петров Изследване на механичните свойства на синтетичен чугун	200
Д. Станков, В. Николов, М. Нинов Контрол и дефектоване на колооси	204
Мара Крумова Кандева Изследване и качествяване на износоустойчиви покрития	215
Bojana Tabakova, Ina Yankova, Peter Petrov Statistical modeling of electron beam welding process for reconstruction of sharp spesimens	221
Петко Кънчев Дефект при уморно разрушаване на материала	228
<b>НЕМЕТАЛНИ МАТЕРИАЛИ</b>	231
Петър Динев, Дияна Господинова Технологични характеристики на магнетронен диелектричен бариерен разряд при атмосферно налягане	232
Петър Динев, Дияна Господинова Технологични характеристики на магнетронен диелектричен бариерен разряд във вакуум	238
Валентин Камбуров Влияние на технологичните параметри върху механичните свойства на студено пресовани лигнино-целулозни материали	245
<b>ЕКОЛОГИЯ</b>	251
Валентин Камбуров Термодинамичен метод и равновесни диаграми на разтворимост на нискоконцентрирани водни разтвори, съдържащи тежки метали	252



## ТЕХНОЛОГИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА МАГНЕТРОНЕН ДИЕЛЕКТРИЧЕН БАРИЕРЕН РАЗРЯД ПРИ АТМОСФЕРНО НАЛЯГАНЕ

Петър Динев, Диляна Господинова

*Диелектричният бариерен (DBD) разряд се разглежда като технологична разновидност на нормалния тлеещ DC разряд при ниско налягане, който от своя страна гори при атмосферно налягане и промишлена честота и стои в основата на много плазмено-химични технологии за повърхнинна модификация на нискоенергийни повърхности. Настоящата работа предлага изследване на технологичните характеристики на една нова плазмена технологична система, изградена на основата на магнетронния диелектричен бариерен разряд (MDBD) – разновидност на DBD- разряд, който гори в постоянно магнитно поле.*

## TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF MAGNETRON DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE AT ATMOSPHERIC PRESSURE

Peter Dineff, Dilyana Gospodinova

*The Dielectric Barrier Discharges (DBD) is well known as a similar form of low pressure glow DC discharge, that ignite and burn at atmospheric pressure under industrial frequency. Dielectric barrier discharges is the basic technological discharge producing cold plasma used in plasma-chemical surface modification technologies. A new magnetron dielectric barrier discharge plasma system is created by DBD burning in permanent magnetic field. Its technological characteristics are investigated in this paper.*

### ВЪВЕДЕНИЕ

Плазмено-химичната повърхностна модификация на ниско енергийни повърхнини, усвоява възможностите на диелектричния бариерен разряд (*dielectric barrier discharge, silent discharge, glow discharge at atmospheric pressure*) да създава студена технологична плазма, богата на химически активни частици.

Диелектричният бариерен разряд (DBD) във въздух се разглежда като важна от технологична гледна точка разновидност на тлеещия (англ. *glow*) разряд при променливо напрежение (AC) с промишлена честота (50+60 Hz), който гори между два електрода, от които поне единият е изолиран с диелектрична бариера, [1, 2].

Прилагането на постоянно външно магнитно поле върху горящия във въздух електрически разряд може да създаде условия за по-интензивно горене на разряда в резултат на по-ефективна йонизация. Същността на известния магнетронен ефект се състои в поставянето на електродната система на разряда във външно постоянно магнитно поле – най-известният електрически разряд с кръстосани електрическо и магнитно полета (англ. *crossed magnetic and electric fields*) е горящия при ниско налягане магнетронен тлеещ разряд. Електроните се движат по спирала около магнитните силови линии, при което се увеличават значително сечението на ударното им взаимодействие и йонизацията.



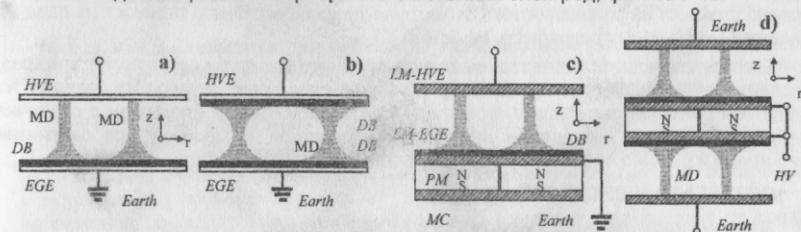
Използването на „магнетронния“ ефект в *DBD*- технологиите може да доведе до по-големи разрядни токове и по-голяма специфична активна мощност на *DBD*, което от технологична гледна точка означава по-високо ефективен процес на плазмено-химична повърхностна модификация на материалите. Специфичната (за единица обем) активна мощност на *DBD* определя технологичната ефективност на разряда.

От друга страна, собственото магнитно поле на отделните микроразряди, които следват един след друг при горенето на *DBD*, би трябвало да влияе върху интензивността на горене на *DBD* между два стоманени (ферромагнитни) плоско паралелни електрода, които играят ролята на магнитопроводи, тъй като взаимодействието на електрическия ток със създаденото от него самия магнитно поле би трябвало да се отрази върху разпределението и гъстотата на микроразрядите и оттам върху външната и технологичната характеристики на *DBD*.

**ЗАДАЧАТА** на тази работа се състои в изучаване на влиянието на собственото и на външно постоянно магнитно поле върху горенето на *DBD* при високо (атмосферно) налягане чрез външната и технологичната му характеристики.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ

Общият вид на обменен плазмен *DBD* реактор с плоско паралелни електроди е показан схематично на фиг. 1. Диелектричният бариерен разряд е представен чрез множество пространствено обособени микроразряди в газова междина на електродната система, които имат специфична форма в зависимост от това дали са в контакт с диелектричната бариера или с металния електрод, фиг. 1а и 1б.



Фиг. 1. Видове обменни плазмени реактори: а – *DBD* обменен плазмен реактор с една диелектрична бариера; б – *DBD* обменен плазмен реактор с две диелектрични бариери; в – магнетрон (*MDBD*) обменен плазмен реактор с една диелектрична бариера; д – магнетрон (*MDBD*) обменен плазмен реактор с две разрядни междини.

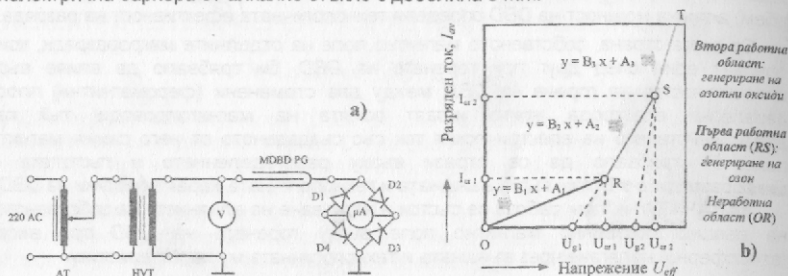
*HVE* и *EGE* – високоволтов и заземен плоско-паралелни електроди; *LM-HVE* и *LM-EGE* – шихтовани (ламинирани) електроди от електротехническа студено валцувана електротехническа стомана; *DB* – диелектрична бариера; *PM* – постоянни магнити; *MC* – магнитопровод

При идентификация на влиянието на собственото магнитно поле на микроразрядите върху елементарните процеси в *DBD* и интегрално върху външната му характеристика двата (*HVE* и *EGE*) електрода се изработват с различна дебелина от насложени листове електротехническа стомана с дебелина 0,35 mm: 0,70 (два листа), 1,05 (три листа), 1,40 (четири листа) и 1,75 (пет листа) mm. Изработват се с размери 205 x 65 mm. Относителната дебелина на електродите спрямо размера на разрядната междина (6 mm) е: 0,117; 0,175; 0,233 и 0,292.

Изследваният технологичен обменен *MDBD* плазмен реактор, фиг. 1с, включва магнитна система, изградена с анизотропни стронциеви постоянни магнити *Sf* (Магнит ООД, Перник, България): 80x57x12 mm:  $H_C \geq 224$  kA/m;  $B_r = 0,37$  T;

$(BH)_{max} \geq 24 \text{ kJ/m}^3$ ;  $\mu_r = 1,2$ ;  $T_Q = 735 \text{ K}$ ;  $\rho_V = 10,6 \text{ }\Omega\text{m}$ ; плътност  $\delta = 4,5+5,0 \text{ g/cm}^3$ ; коэффициент на линейно разширение  $\delta l = (9+15) \cdot 10^{-6}$ ; твърдост – 55 HRC.

Експерименталните DBD и MDBD плазмените реактори имат само по една диелектрична бариера от алкално стъкло с дебелина 3 mm.



Фиг. 2. Електрическа схема за снемане на външната характеристика на DBD и MDBD плазмени генератори (а) и общ вид на външната характеристика на разрядите (б).

AT – аутотрансформатор; HVT – повишаващ трансформатор; D1, D2, D3 и D4 – диоди позволяващи директното измерване на средната стойност на разрядния ток  $I_{av}$ .

Изследването на създадените DBD и MDBD плазмени реактори се извършва по известния метод на външната характеристика, представляваща изменението на средна стойност на разрядния ток  $I_{av}$  във функция от ефективната стойност на пада на напрежение  $U_{eff}$  върху разрядната междина, [2].

Експерименталното изследване включва следните три групи експерименти: първо, изследване на DBD плазмен реактор с медни електроди; второ, изследване на плазмени реактори със същата геометрия, но с феромагнитни електроди с различна дебелина; трето, изследване на плазмени реактори с медни и феромагнитни електроди и външно постоянно магнитно поле, създадено от постоянни магнити.

## РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

### Външна характеристика на DBD и MDBD разряди

Изследването е извършено чрез експериментално снетите външни характеристики на DBD и MDBD плазмените реактори с феромагнитни шихтовани електроди с различна дебелина  $\Delta$  при напрежения до 15 kV, като изследването се ограничава в първата технологична област (RS) от външните характеристики на разрядите, фиг. 3.

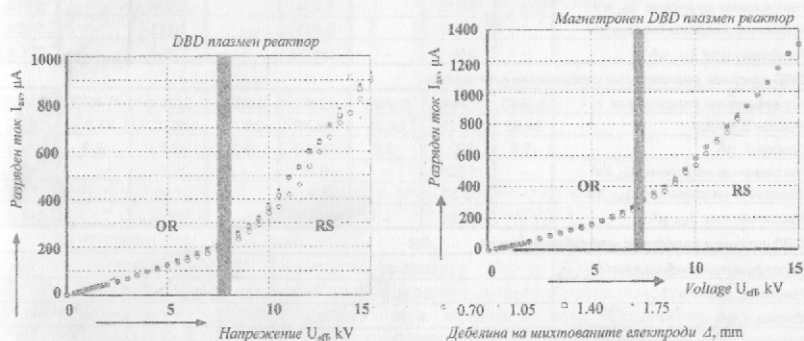
Проведените експериментални изследвания върху влиянието на феромагнитните електроди и на външното постоянно магнитно поле върху външната характеристика на DBD разряда при атмосферно налягане и стайна температура позволяват следните основни изводи, фиг. 3, Табл. 1:

- дебелината на феромагнитните електроди влияе съществено върху външната характеристика и на двата разряда DBD и MDBD, което има своето обяснение в двойната роля на феромагнитните електроди – по отношение на електрическото и на магнитното полета;

- получените линейни модели на отделните участъци (OR и RS) на външната характеристика може да бъдат използвани при анализа поради високите стойности на получените коефициенти на линейна корелация, фиг. 3, табл. 1;



- увеличаването на дебелината на електродите води до по-ниско напрежение на горене на разряда, критично напрежение и критичен ток на запалване;
- прилагането на външно магнитно поле – *MDBD* разряди, намалява още критичното напрежение на запалване и на горене на разряда, но увеличава съществено критичния ток на запалване на разряда;
- изменението на параметрите на работната част от характеристиката (*RS*) – наклонът *B* и отрезът *A*, както и критичните параметри  $I_{cr,1}$  и  $U_{cr1}$  потвърждават възможността за използване на този електромагнитен ефект в практиката.



Фиг. 3. Външни характеристики на *DBD* и на *MDBD* плазмени реактори (при атмосферно налягане), в зависимост от дебелината  $\Delta$  на шихтованите феромагнитни електроди, или от броя на ламелите от студено валцувана стомана (дебелина на ламелата 0,35 mm).

### Технологични характеристики на *DBD* и *MDBD* разряди

Технологичната характеристика на *DBD* и *MDBD* разряди се свързва с зависимостта на специфичната обемна (за единица обем)  $\rho_0$  и повърхнинна (за единица повърхност на електродите)  $\rho_s$  активна мощност от приложеното върху електродната система напрежение  $U_{eff}$ , която може да се получи от външната характеристика по следния начин, [2]:

$$\rho_0 = \frac{P}{g} = \frac{U_g (I_{av} + I_{cr,1})}{g} = \frac{U_g [(B_2 U_{eff} - A_2) - I_{cr,1}]}{g} = \frac{U_g B_2 U_{eff} - U_g (A_2 + I_{cr,1})}{g} \quad (1)$$

$$\rho_0 = \frac{1}{g} [D_2 U_{max} - C_2] \quad (2)$$

$$\rho_s = \frac{1}{S} [D_2 U_{max} - C_2] \quad (3)$$

където  $v$  е обемът на разрядната междина, 80 cm<sup>3</sup>, а  $s$  – активната повърхност на електродите, 133,25 cm<sup>2</sup>.

Предположението за влияние на собственото магнитно поле върху технологичната ефективност на *DBD* се потвърждава експериментално при замаяната на диамагнитните медни електроди със феромагнитни електроди от студено валцувана електротехническа стомана – увеличението на специфичната активна мощност на разряда в режим *RS* е около шест пъти, като общото увеличение след последващото внасяне на електродната система във външно постоянно магнитно поле е повече от осем пъти, фиг. 4.



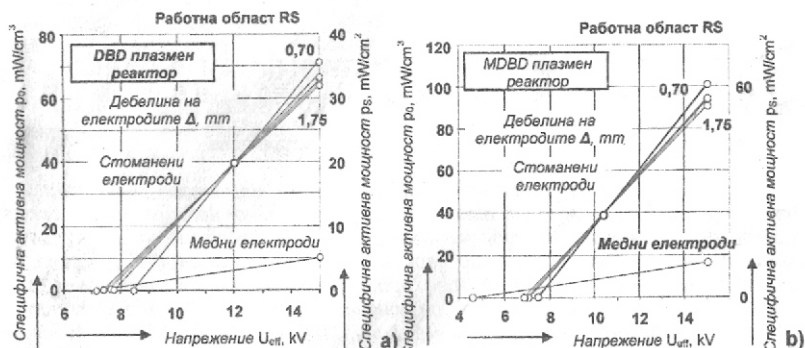
Таблица 1. Външни характеристики и критични параметри на DBD и MDBD плазмени реактори със стоманени електроди при атмосферно налягане

Дебелина на електродите $\Delta$ , mm	0,7		1,05		1,4		1,75	
Режими на работа	OR	RS	OR	RS	OR	RS	OR	RS
<b>Магнетронен DBD плазмен реактор със стоманени електроди</b>								
Корелационен коефициент $r$ , -	0.9937	0.9937	0.9949	0.9949	0.9965	0.9949	0.9965	0.9928
Наклон $B$ , $\mu A/kV$	34.72	133.99	35.61	127.76	34.67	127.76	34.73	124.30
Отрез $A$ , $\mu A$	-12.6	-752.3	-13.1	-664.8	-11.7	-664.8	-11.7	-623.4
Напрежение на горене $U_g$ , kV	-	5.615	-	5.204	-	5.204	-	5.015
Критично напрежение $U_{cr1}$ , kV	-	7.452	-	7.073	-	7.016	-	6.828
Критичен ток $I_{cr1}$ , $\mu A$	-	246.1	-	238.79	-	231.6	-	225.4
<b>DBD плазмен реактор със стоманени електроди</b>								
Корелационен коефициент $r$ , -	0.9993	0.9892	0.9990	0.9862	0.9981	0.9839	0.9973	0.9222
Наклон $B$ , $\mu A/kV$	24.82	96.78	24.81	96.78	25.78	95.72	26.83	86.22
Отрез $A$ , $\mu A$	-3.9	-602.7	-3.9	-602.7	-5.2	-537.9	-6.8	-456.8
Напрежение на горене $U_g$ , kV	-	6.228	-	6.22	-	5.62	-	5.30
Критично напрежение $U_{cr1}$ , kV	-	8.32	-	8.32	-	7.61	-	7.58
Критичен ток $I_{cr1}$ , $\mu A$	-	202.5	-	202.5	-	191.2	-	196.6
<b>DBD плазмен реактор с медни електроди</b>								
	OR				RS			
Корелационен коефициент $r$ , -	0.9994				0.9872			
Наклон $B$ , $\mu A/kV$	26.53				36.87			
Отрез $A$ , $\mu A$	4.72				71.45			
Напрежение на горене $U_g$ , kV	-				1.992			
Критично напрежение $U_{cr1}$ , kV	-				7.144			
Критичен ток $I_{cr1}$ , $\mu A$	-				184.8			

Предположението за влияние на собственото магнитно поле върху технологичната ефективност на DBD се потвърждава експериментално при замената на диамагнитните медни електроди със феромагнитни стоманени електроди от студено валцувана електротехническа стомана – увеличението на специфичната активна мощност  $p_0$  ( $p_S$ ) на разряда в режим RS е около шест пъти, като общото увеличение след внасянето на електродната система във външно постоянно магнитно поле е повече от осем пъти, а това означава и увеличение на технологичната ефективност на разряда, фиг. 4.

Таблица 2. Технологични характеристики  $W(U_{max})$  на DBD и MDBD плазмени реактори със стоманени електроди при атмосферно налягане

Дебелина на електродите $\Delta$ , mm	0,7		1,05		1,4		1,75	
<b>Магнетронен DBD плазмен реактор със стоманени електроди</b>								
Корелационен коефициент $r$ , -	0,9937		0,9949		0,9949		0,9928	
Наклон $D_2$ , mW/kV	1068,266		944,1012		944,1012		885,1712	
Отрез $C_2$ , mW	7959,995		6677,238		6624,101		6044,557	
<b>DBD плазмен реактор със стоманени електроди</b>								
Корелационен коефициент $r$ , -	0,9892		0,9862		0,9839		0,9222	
Наклон $D_2$ , mW/kV	855,834		854,7974		763,869		648,8974	
Отрез $C_2$ , mW	7120,42		7111,843		5818,507		4917,488	
<b>DBD плазмен реактор с медни електроди</b>								
Корелационен коефициент $r$ , -					0,9872			
Наклон $D_2$ , mW/kV					101,459			
Отрез $C_2$ , mW					724,7964			



Фиг. 4. Сравнение на технологичните характеристики на DBD (a) и MDBD (b) плазмени реактори със стоманени електроди

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От експерименталните изследвания върху DBD и MDBD плазмени генератори със стоманени електроди, могат да бъдат направени следните основни изводи:

1. Замяната на медните диамагнитни електроди със стоманени подобрява съществено технологичните характеристики на DBD, нещо повече – тя разкрива влиянието на собственото магнитно поле върху разряда;
2. Ефектът на външното магнитно поле върху характеристиките на DBD се проявява при атмосферно налягане и също така може да бъде практически използван за подобряването на технологичните характеристики на DBD.
3. Предложената конструкция на плазмен MDBD, фиг. 1d, позволява пълното използване на възможностите на постоянните магнити и реализирането на двойно по-голям плазмен обем.

## ЗА АВТОРИТЕ

Д-р Петър Динев е доцент по Електрически апарати (Електротехнология) към Електротехническия факултет на Техническия университет в София (България), e-mail: dineff\_pd@abv.bg

Д-р Дилиана Господинова е главен асистент по Електротехнология към Електротехническия факултет на Техническия университет в София (България), e-mail: dilianang@abv.bg

## БЛАГОДАРНОСТИ

Националният фонд „Научни изследвания“ към Министерството на Образованието и науката на Република България финансира тези изследвания чрез следните изследователски проекти ВУ-ТН-205/2006 и ВУФ-09/2005.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] G. Pietsch and V. Gibalov. *Dielectric barrier discharges and ozone synthesis*. Pure&Applied Chemistry, Vol. 70, No. 6, 1998, pp. 1169+1174.
- [2] P. Dineff and D. Gospodinova. *Electric Characteristics of Barrier Discharge*. XXXVI. International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies "ICEST '2003". Sofia, Bulgaria, October 16+18, 2003. Proceedings, Heron Press. Ltd., 2003, pp. 442+445.