



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 ВЪВ ВАКУУМ

Петър Динев, Диляна Господинова

В тази работа се разглежда поведението на магнетронен диелектричен бариерен (DBD) разряд при атмосферно и понижено налягане (във вакуум). Доказано е експериментално, че независимо от действието на външните фактори налягането и силовото постоянно магнитно поле, DBD запазва своя характер на поведение – той гори при постоянен пад на напрежение върху електродната система, т. е. той се основава на един и същ вид елементарни процеси, протичащи в разрядната междина. Магнетронният DBD се възприема като разновидност на бариерния разряд, който има висока технологична ефективност във вакуум, както би трябвало да се очаква в областта на 0,1 kPa.

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

Peter Dineff, Dilyana Gospodinova

The Magnetron Dielectric Barrier Discharge (MDBD) is a similar form of the well known Dielectric Barrier Discharge that ignite and burn at atmospheric pressure and room temperature under industrial frequency. DBDs are the basic technological discharges producing cold plasma in this conditions used in plasma-chemical surface modification technologies. A new MDBD plasma system is created by DBD burning in permanent magnetic field. Its technological and control characteristics are investigated in this paper.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Плазмено-химичната повърхностна модификация на ниско енергийни повърхнини използва основно възможностите на диелектричния бариерен разряд (dielectric barrier discharge, silent discharge, or glow discharge at atmospheric pressure) да създава студена технологична плазма при атмосферно налягане.

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 при атмосферно налягане между два електрода, от които поне единият е изолиран с диелектрична бариера, [1, 2].

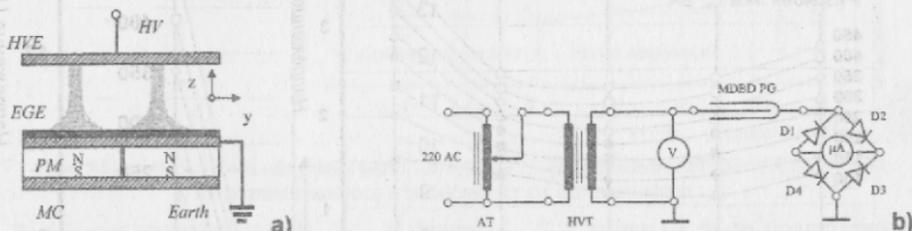
Теорията на магнетронния тлеещ разряд при постоянно напрежение (DC) и ниско налягане (във вакуум) е разработена от R. Redhead, а неговото практическо приложение се определя от използваните налягания. В същото време е доказано, че магнетронният диелектричен бариерен разряд (MDBD) гори устойчиво при атмосферно налягане и може да бъде използван ефективно за производство на озон и за повърхностна модификация на материалите, [3].

**ЗАДАЧАТА** на тази работа се състои в изучаване на поведението на MDBD при ниско налягане чрез външната и технологичната характеристики, като се оценява

неговата приложимост в областта на повърхнинните технологии за модификация на нискоенергийни материали - полимери и полимерни материали, целулозни материали, дървесина и на изделия от тях.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ

Общият вид на обменен плазмен *DBD* реактор с плоско паралелни електроди и дена диелектрична бариера от алкално стъкло е показан схематично на фиг. 1.



Фиг. 1. Общ вид на магнетронен (*MDBD*) обменен плазмен реактор с една диелектрична бариера (а) и електрическа схема за снемане на външната му характеристика (b).

*HVE* и *EGE* – високоволтов и заземен плоско-паралелни медни електроди; *DB* – диелектрична бариера от алкално стъкло; *PM* – постоянни магнити; *MC* – магнитопровод;

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

Изследваният технологичен обменен *MDBD* плазмен реактор използва медни (диамагнитни) електроди с размери 205 x 65 mm. Работната междина реактора е с ширина 6 mm.

Изследването на *MDBD* плазмения реактор се извършва по известния метод на външната характеристика, представляваща изменението на средна стойност на разрядния ток  $I_{av}$  във функция от ефективната стойност  $U_{eff}$  или максималната стойност  $U_{max}$  на пада на напрежение върху разрядната междина. [4].

Това изследване включва експерименталното снемане по точки на външната характеристика при различни налягания от областта на устойчиво горене на *MDBD*, след което на нейна основа се определят всички параметри на разряда за първата *RS* технологична област (на кислорода) и се построява технологичната характеристика на *MDBD*. [3, 4].

### РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

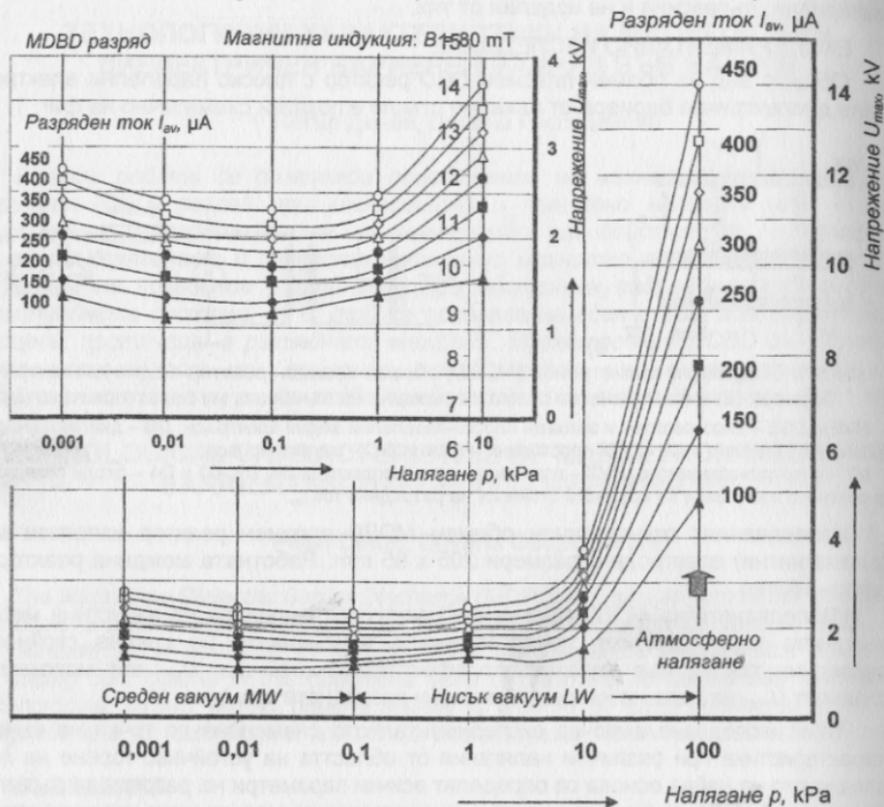
#### Външна характеристика на *DBD* и *MDBD* разряда

Изследването е извършено чрез външните характеристики на *MDBD* реактор при избрани налягания. Наляганията се избират от цялата област на горене на разряда – от атмосферно налягане -  $\approx 100$  (101,325) kPa, до границата на устойчиво горене във вакуум - 1 (1,8): 100 : 100, 10; 1; 0,1; 0,01 и 0,001 kPa, и обхващат областта на ниския и част от средния вакуум. Изследването на *MDBD* във въздуха, като остатъчен газ при ниско налягане, се ограничава в първата технологична област (*RS*) от външната характеристика на разряда, [3].

Зависимостта на напрежението  $U_{max}$  от налягането  $p$  при постоянен фактор  $pd = const$ ,  $d = 6$  mm, фиг. 2, има характерния вид на зависимостта, изразяваща закона на *Paschen*. Този вид на кривата потвърждава неизменността на характерния белег на *DBD* и при *MDBD*, или *MDBD* има поведението на *DBD* при атмосферно налягане, независимо от степента на понижаване на налягането, т. е. разрядът гори



при постоянен пад на напрежение върху електродната система, който се нарича напрежение на горене  $U_g$  и е различен при изменение на налягането, фиг. 4.



Фиг. 2. Зависимост на максималната стойност на напрежението  $U_{eff}$  от налягането  $p$  при параметър средната стойност на разрядния ток  $I_{av}$  – минималното напрежение на горене на MDBD се отчита на границата между ниския и средния вакуум.

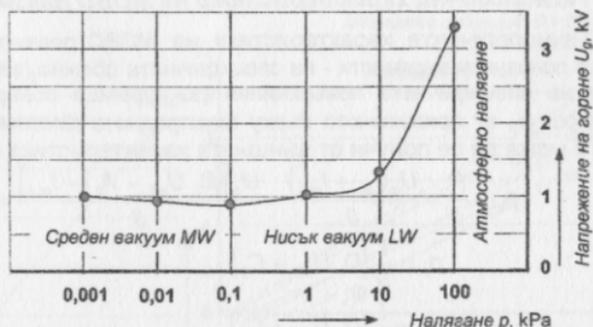
$U_g$  върху електродната система. Увеличаването на пада на напрежението  $U_{max}$  отразява увеличаването на пад на напрежение върху външната част на електрическата верига - то нараства пропорционално на увеличавания се разряден ток, фиг. 2.

Таблица 1. Външни характеристики  $U_{max}$  ( $I_{av}$ ) и параметри на MDBD плазмен реактор с медни електроди при изменение на налягането

Налягане $p$ , кПа	100,000	10,000	1,000	0,100	0,010	0,001
Корелационен коефициент $r$ , -	0,9994	0,9990	0,9965	0,9987	0,9924	0,9952
Наклон $D_2$ , $\mu A/kV$	42,017	188,68	312,5	322,58	303,03	256,41
Отрез $C_2$ , $\mu A$	137,8	245,91	319,875	285,806	284,424	260,179
Напрежение на горене $U_g$ , кВ	3,280	1,303	1,020	0,886	0,939	1,010
Критичен ток $I_{cr}$ , $\mu A$	50	50	50	50	50	100
Критично напрежение $U_{cr}$ , кВ	4,540	1,568	1,184	1,041	1,104	1,321

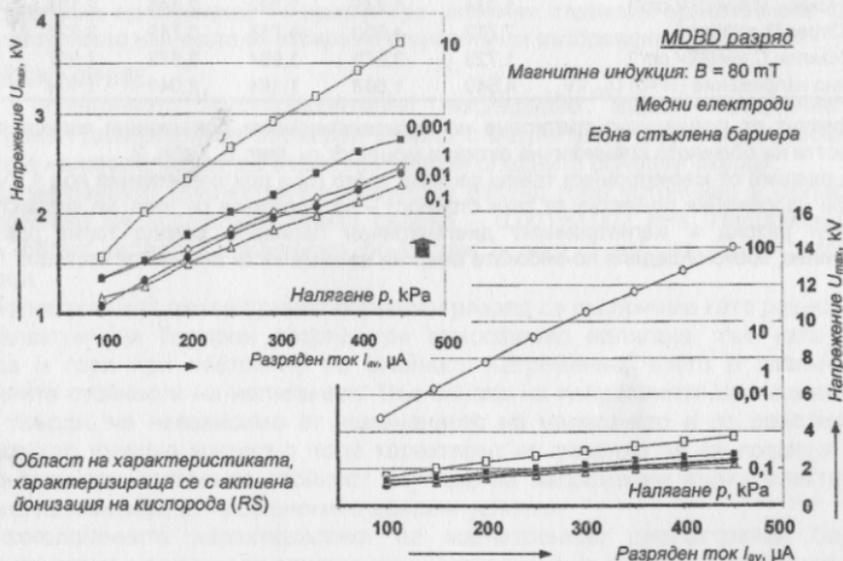


MDBD разряд  
Магнитна индукция:  $B = 80 \text{ mT}$



Фиг. 3. Изменение на напрежението на горене  $U_g$  (максимална стойност) на MDBD плазмен реактор, в зависимост от налягането  $p$ .

Външната характеристика,  $U_{max}(I_{av})$  или  $U_{eff}(I_{av})$ , може да бъде представена в първата работна област RS като линейна зависимост на средната стойност на разрядния ток  $I_{av}$  от максималната  $U_{max}$  или ефективната  $U_{eff}$  стойност на напрежението, което отново потвърждава характера на MDBD – разновидност на диелектричния бариерен разряд, фиг.4, Табл. 1.



Фиг. 4. Външни характеристики  $U_{max}(I_{av})$  на MDBD плазмен реактор при атмосферно налягане и при ниско налягане (вакуум), в зависимост от изменението на налягането  $p$

**Технологични характеристики на MDBD плазменния реактор**

Технологичните характеристики на MDBD плазменния реактор се определят чрез двете основни зависимости - на специфичната обемна (за единица обем) активна мощност  $p_0$  и на специфичната повърхнинна (за единица повърхност на електродите) активна мощност  $p_s$  от приложеното върху електродната система напрежение  $U_{max}$ , или ( $U_{eff}$ ), която може да се получи от външната характеристика по изчислителен начин, [3]:

$$p_0 = \frac{P}{g} = \frac{U_g(I_{av} + I_{cr,i})}{g} = \frac{U_g[(B_2 U_{eff} - A_2) - I_{cr,i}]}{g} = \frac{U_g B_2 U_{eff} - U_g(A_2 + I_{cr,i})}{g} \quad (1)$$

$$p_0 = \frac{1}{g} [D_2 U_{eff} + C_2] \quad (2)$$

$$p_s = \frac{1}{S} [D_2 U_{eff} + C_2] \quad (3)$$

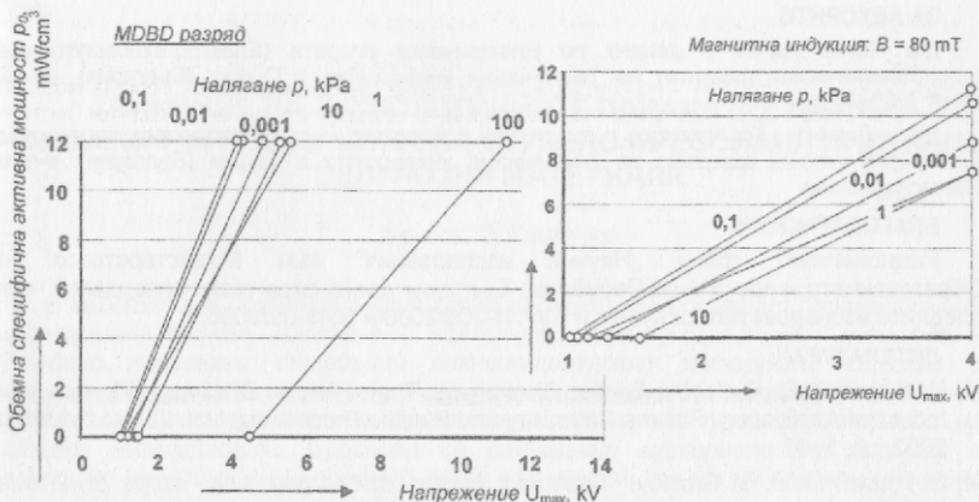
където  $v$  е обемът на разрядната междина,  $80 \text{ cm}^3$ , а  $S$  - активната площ на електродите,  $133,25 \text{ cm}^2$ .

Таблица 2. Технологични характеристики -  $W(U_{max})$ ,  $p_s(U_{max})$  и  $p_0(U_{max})$  на MDBD плазмен реактор с медни електроди при атмосферно и ниско налягане

Налягане $p$ , kPa	100	10	1	0,1	0,01	0,001
Корелационен коефициент $r$ , -	0,9994	0,999	0,9965	0,9987	0,9924	0,9952
$W$ Отрез $D$ , mW	622,544	385,57	377,27	297,52	314,02	342,17
Наклон $C$ , mW/kV	137,816	245,85	318,75	285,80	284,54	258,97
$p_s$ Отрез $D$ , mW/cm <sup>2</sup>	4,672	2,894	2,831	2,233	2,357	2,568
Наклон $C$ , mW/(kV.cm <sup>2</sup> )	1,034	1,845	2,392	2,145	2,135	1,943
$p_0$ Отрез $D$ , mW/cm <sup>3</sup>	7,782	4,820	4,716	3,719	3,925	4,277
Наклон $C$ , mW/(kV.cm <sup>3</sup> )	1,723	3,073	3,984	3,572	3,557	3,273
Критично напрежение ( $W=0$ ) $U_{cr}$ , kV	4,540	1,568	1,184	1,041	1,104	1,321

Ефектът от плазменото третиране на нискоенергийните повърхнини зависи пряко от стойността на обемната специфична активна мощност  $p_0$ , фиг. 5, Табл. 2.

За разлика от магнетронния тлеещ разряд, който гори при напрежения под 1 kV, MDBD гори при напрежения по-високи от тази стойност - потвърждава се това, че диелектричният бариерен разряд и магнетронният диелектричен бариерен разряд горят при високо напрежение, което определя по-високата енергия на химически активните частици.



Фиг. 5. Технологични характеристики  $\rho_0$  на MDBD плазмен реактор с медни електроди при изменение на налягането  $\rho$

Повърхнинната специфична активна мощност  $\rho_s$  се движи в границите до около 20+25 mW/cm<sup>2</sup> за режима RS. Тя позволява оценяване на необходимата активна мощност на захранващия електрически генератор при различни стойности на активната площ на електродите, която най-често се избира по технологични съображения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От проведеното експериментално изследване върху поведението на магнетронен диелектричен бариерен разряд с медни електроди при атмосферно и понижено налягане, могат да бъдат направени следните основни изводи:

4. Магнетронният диелектричен бариерен разряд гори устойчиво в областта на съществуване на нормалния тлеещ разряд – 0,001+0,002 kPa. Напреженията на горене обаче остават значително по-високи – над 1 kV, за целия изследван диапазон.

5. Магнетронният диелектричен бариерен разряд се възприема като разновидност на диелектричния бариерен разряд при атмосферно налягане, тъй като той се запалва и гори при постоянно по стойност напрежение, което е различно при различните стойности на налягането. Въз основа на направеното изследване може да се твърди, че независимо от изменението на налягането и от действието на приложеното външно магнитно поле характерът на разряда не се променя – този разряд гори при постоянна стойност на пада на напрежение върху електродната система, независимо от променените външни условия.

6. Технологичните характеристики на магнетронния диелектричен бариерен разряд показват, че неговата активна мощност и химична ефективност е максимална около минималната стойност на напрежението на горене – при 0,1 kPa, т.е. при тези условия може да се очаква максимална производителност на технологичния процес, или произвеждането на максимален брой химични реакции с обмен на електрони.



### ЗА АВТОРИТЕ

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

Д-р Дилияна Господинова е главен асистент по Електротехнология към Електротехнически факултет на Технически 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

- [3] U. Kügelschatz. Dielectric Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Application. Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 23, No 1, March, 2003, pp. 1+46.
- [4] G. Pietsch and V. Gibalov. *Dielectric barrier discharges and ozone synthesis*. Pure&Applied Chemistry., Vol. 70, No. 6, 1998, pp. 1169+1174.
- [5] P. Dineff, D. Gospodinova. *Magnetron Dielectric Barrier Air Discharge at Low Frequency*. International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems "ICEST 2007", 24-27 June 2007, Ohrid, Macedonia. Proceedings of full papers, vol. 1, pp. 811+814.
- [6] 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.