



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

---

проф. д-р инж. Росен Николов Василев

ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕТОДИТЕ И СРЕДСТВАТА ЗА ПОВЪРХНОСТНО  
ОБРАБОТВАНЕ НА МАТЕРИАЛИ ЗА ДЕНТАЛНИ ИМПЛАНТИ

## **АВТОРЕФЕРАТ**

на дисертация за получаване на НС „Доктор на науките“

Професионално направление: 5.1. Машинно инженерство

Научна специалност: „Технология на машиностроителните материали“

Варна 2017г.

Дисертационният труд е обсъден на 17.05.2017г. в катедра “Материалознание и технология на материалите ” на разширен катедрен съвет, съгласно заповед на Ректора на ТУ-Варна № 214/27.04.2017г. и насочен за защита.

Автор: проф.д-р инж. Росен Николов Василев

Заглавие: „Изследване на методите и средствата за повърхностно обработване на материали за дентални импланти“.

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

проф. д-р инж. Росен Николов Василев

ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕТОДИТЕ И СРЕДСТВАТА ЗА ПОВЪРХНОСТНО  
ОБРАБОТВАНЕ НА МАТЕРИАЛИ ЗА ДЕНТАЛНИ ИМПЛАНТИ

## **АВТОРЕФЕРАТ**

на дисертация за получаване на НС „Доктор на науките“

Професионално направление: 5.1. Машинно инженерство

Научна специалност: „Технология на машиностроителните материали“

Варна 2017

Дисертационният труд съдържа 356 страници с включени 103 фигури, 41 таблици, 99 математически зависимости, оформени във въведение, 7 глави (обзорна с изводи, цели и задачи на дисертацията, методология на изследването, изследване стабилността и ефективността на апаратура за плазменопреховото напластяване АПН-50, влияние на технологичните параметри върху изходните електрически величини, изследване стабилността и ефективността на работата на плазмотрона, моделиране кинетиката на плазмено газово азотиране на титанови сплави с индиректен плазмотрон ПН50, изследване дизайна на дентални титанови импланти), списък на използваната литература от 530 заглавия, от които 68 на кирилица и 462 на латиница, списък с публикациите на автора по темата на дисертационния труд и 6 приложения.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на \_\_\_\_\_ г. от  
ч. в открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора  
№ \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ г.  
Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на  
разположение на интересувашите се във ФД „Докторанти“, стая 318 НУК.

## **I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИЯТА**

### **1. *Актуалност на проблема.***

Един от материалите, който в последните десетилетия е обект на усилено изучаване е титанът и неговите сплави.

Плазменото напластяване на титана и титановите сплави и тяхното приложение в медицината е особено ефикасно в сферата на денталната имплантология, където плазменонапластените биосъвместими покрития осигуряват успешната остеоинтеграция.

Последните години доказват особено важната роля на зъбните титанови импланти при възстановяване на един или повече зъби от човешката челюст. Те са приети за стандарт в съвременната имплантология. Имплантите изпълняват естетична, функционална и профилатична функция. Естетична поради възстановяването на естетиката вследствие загубата на зъби, функционална и профилактична поради възстановяването и запазването на костта от атрофия.

От направения обзор на темата могат да се направят следните изводи:

В литературата е малко информацията за влиянието на ресурсните и електрическите параметри, свързани със задаване на работна точка и управление - дебит на газ, разход на прах, ток и напрежение, върху стабилността на процеса, коефициента на полезно действие на плазмотрона и качествата на покритието.

Факторите оказващи въздействие върху стабилността на дъгата и електромагнитната съвместимост на процеса се разглеждат повърхностно и като две несвързани понятия.

Няма изградена цялостна методика за мониторинг на процеса.

### ***Цел и задачи на дисертацията.***

Въз основа на направените изводи от литературния обзор и във връзка с актуалността на процеса плазмено прахово напластяване като главна цел на дисертацията се поставя: "Изследване на методите и средствата за повърхностно обработване на материали за дентални импланти".

За постигането на тази цел са поставени следните основни задачи:

1. Разработване на методология на изследването.
2. Изследване стабилността и ефективността на апаратура за плазмено прахово напластяване АПН-50.
3. Изследване влиянието на технологичните параметри върху изходните електрически величини.
4. Изследване стабилността и ефективността на работа на плазмотрона

5. Моделиране кинетиката на плазмено газово азотиране на титанови сплави с индиректен плазмотрон PN50
6. Изследване дизайна на дентални титанови импланти

## **2.        *Обект и място на изследване***

Обект на изследване в настоящата работа са методите и средствата за повърхностно обработване на материали за дентални импланти, в частност методът за плазмено повърхностно модифициране на титан и най-често използваните титанови сплави Ti-6Al-4V, установяване на технологичните възможности на метода за оптимизиране режимните параметри по експериментален път чрез създаване на нова конструкция на индиректен плазмотрон, изследване дизайна на дентални титанови импланти, чрез разработване на действаща методика за оптимизиране проектиращите възможности и трансфера на информационните данни на 3D дентални компоненти.

Изследванията са проведени в лабораторната база на Технически Университет Варна, технологичната базата на фирма „PLAZMA” ЕООД, Sakarya University-Турция, и AO Research Institute Davos- Швейцария.

## **3.        *Научна новост на изследването.***

Като научна новост може да се определи: (1.) Разработени са методики за анализ и оценка на основните фактори, влияещи върху процеса плазмено напастяване. Разработените математически модели дават оценка за тежестта на влияние на всеки от значимите фактори. (2.) Разработени са модели за симулация и мониторинг на развитието на повърхностните слоеве по време на плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон на титанови сплави. Моделите се основават на анализ и числени решения на уравнението на дифузия. Те са полезни инструменти за оптимизиране на параметрите на повърхностно азотиране на титанови сплави. (3.) Създадена е принципна схема и е направена декомпозиция на енергията вложена при процеса плазмено прахово напастяване с индиректен плазмотрон. (4.) Установена е корелацията между спектъра на измерваните сигнали и периодичността на процесите в плазмотрона. Наблюдава се високочестотна лента на спектъра в областта 2-5kHz породена от флукуациите и завихрянето на дъгата.

## **4. *Реализация на резултатите.***

Основните практически приноси се отнасят до: (1) Създаден е нов дизайн на дентален имплантит изработен от титанова сплав Ti-6Al-4V. (2)

Разработена е технология за нанасяне на антибактериално златно покритие върху дентални импланти изработени от титанов сплав Ti-6Al-4V.

### **5. Аprobация на резултатите.**

Основните резултати от изследванията са докладвани и публикувани в следните научни форуми и издания:

- Международна научна конференция ICEST 2010-2015.
- VIII International Conference, Strategy of Quality in Industry and Education – volume 1, p. 139-142, 8-15 VI 2012г., ISBN 978-966-2637-11-3.
- Трети международен конгрес, ISBN 978-954-20-0553, 2012.
- Международна научно - техническа конференция "Електроенергетика 2014", Сборник Доклади, стр. 143÷147, ISBN 978-954-20-0497-4, 11-13 септември 2014, Варна, България.
- Journal of Materials Science and Technology, Vol.22, N<sub>0</sub> 2, pp.57-75, 2014.
- Tem Journal, Volume 4, Number 4, 2015, pp. 332-335, [www.temjournal.com](http://www.temjournal.com).
- Известия на С.У.серия Технически науки, ISSN 1310-5833, 2012-2015.
- Списание „Машиностроителна техника и технологии“, НТС, ТУ-Варна, 2014-2016, ISSN 1312-0859.
- Списание „Механика на машините“, 2015г.-2017г., ISSN 0861-9727.

### **6. Публикации по дисертацията.**

Основните етапи от разработването на дисертационния труд са отразени в 13 публикации, списък на които е приложен в края на автореферата.

## **II. КРАТКО ИЗЛОЖЕНИЕ НА ОСНОВНИТЕ РЕЗУЛТАТИ ОТ ДИСЕРТАЦИЯТА.**

**ГЛАВА 1. Дентална имплантология - свойства на материалите и методи за повърхностно обработване на титан и титанови сплави**

### **Същност и свойства на денталните импланти**

Денталните импланти представляват конични, цилиндрични или комбинирани титанови винтове и служат като заместители на естествените зъбни корени в зоните на липсващите зъби. Този имплант е изкуствен зъбен корен, който позволява стабилност за изкуствената корона. Задръжането на зъбните корени в костта осигурява стабилна основа за зъбите.

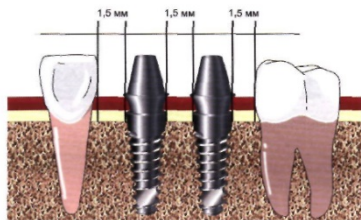
Ролята на костта е да осигурява стабилност на зъбните корени, а от друга страна зъбните корени запазват костта във функционална и анатомична цялост. Когато по някакви причини се загубят зъби, костта която е поддържала техните корени се стопява и смалява. Този процес се нарича костна резорбция

(атрофия). Все пак костта може да бъде предпазена от резорбция чрез заместването на зъбните корени със зъбни импланти фиг. 1.1.



**Фиг.1.1. Заместване на зъбните корени със зъбни импланти**

Въпреки, че специалистите по дентална медицина правят всичко възможно, за да запазят заболялия зъб в устата на пациента си, понякога изваждането на зъба е неизбежно. Строго препоръчително е появилият се дефект в зъбната редица да се възстанови. В противен случай се отключват механизми на функционална патология. Съседните зъби се наклоняват към липсващото място в зъбната редица, зъбът от противоположната челюст прораста (феномен на Годон) и така с течение на времето все по-сложно се оказва възстановяването на получения дефект. Възстановяване на зъбната редица може да се получи чрез изпиляване на съседните зъби и да се направи мост (ако позволява клиничната ситуация). Недостатъците са, че се засягат съседните зъби, което не е препоръчително особено, ако са живи. Затова едно много съвременно решение на проблема е поставянето на импланти. Импланта представлява изкуствен корен на зъб, който се навива в костта. След време костните клетки прорастат и той остава здраво поместен в костта. Това е „винтче“, което е направено от абсолютно биологично поносим материал. Поставя се на мястото на липсващия зъб и след време (около 3 месеца) се навива надстройка, след което се взима отпечатък и се изработва коронката в лабораторията.



**Фиг. 1.4. Минимално разстояние от импланта до съседните зъби и между имплантите.**



При разработването на определени размери на денталните импланти е необходимо да се предвиди тяхното съотношение спрямо обема на прилежащата челюстна кост (фиг. 1.4).

#### **Имплантационни биосъвместими материали**

Материалите, използвани за направата на вътрешнокостни импланти се считат за биосъвместими, когато на тяхната повърхност протича процес на формиране на костна тъкан и се създава интерфейс способен към правилно разпределение на функционалното натоварване. Биосъвместимите материали трябва да притежават определени физико – химични, биохимични и биомеханични свойства.

Биоактивни материали представляват материали, които се включват в йонният обмен и метаболизъм на костната матрица, като частично или цялостно замества костната тъкан в процеса на нейната регенерация.

Биоактивни материали са калций – фосфатни съединения (трикалций – фосфат и хидроксиапатит), калциев сулфат, биостъкло и материали на основата на някои високомолекулярни полимери.

В чистият титан и в Ti-6Al-4V, топлопроводимостта и електрическото съпротивление значително варират. Тези две величини зависят от плътността и степента на разсейване на електроните.

#### **Методи за повърхностно уякчаване.**

Полагат се значителни усилия за развитие на технологиите за обработка на титановите сплави с цел получаване на дълготраен защитен повърхностен слой и разширяване сферите на приложение. За да се постигнат желаните свойства на материала се използват различни видове повърхностна обработка. Използват се основно две характерни направления техники на отлагане и на дифузия.

Техниките на отлагане се характеризират с пренасяне на материя /метал/ от сходни източници и отлагането му по повърхността на обработвания материал /метал/. Те включват електронанасяне /electroplating/, физично нанасяне /PVD/, химично нанасяне /CVD/. При химичното нанасяне теоретично всеки елемент или сплав може да бъде депозиран върху образеца. При титановите сплави обикновено елементите, които се използват за образуване на повърхностния слой са TiN, TiC, TiB, TiO, диамант и други. Те са твърди материали и могат да осигурят защитен слой с добра адхезия към титановия образец.

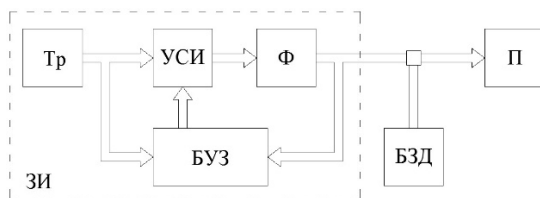
Дифузионните техники азотиране, цементация, газово цианиране и бориране се характеризират с осигуряване на дифузия между образеца и материала, който се нанася върху него. Обикновено това са атоми от елементи с малък диаметър, като въглерод, азот, сяра, бор и кислород. Тези елементи

образуват съединения с повърхностния слой на образца при осигуряване на подходяща температура и време за провеждане на реакцията. Традиционните цементация и азотиране много години се предпочитат от металурзите, но за осъществяване на по-ефективна повърхностна обработка и повишаване качествата на образувания повърхностен слой се използват нови технологии, като управляемо газово третиране, йонно имплантиране и плазмено азотиране. В последно време се обръща значимо внимание на техники, като лазерна повърхностна обработка и електродъгова повърхностна обработка чрез разтапяне.

#### Плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон.

В това направление се работи интензивно, като в последните години изследванията показват, че решаването на основните проблеми може да бъде постигнато чрез използване на плазмена апаратура снабдена с плазмотрон с индиректна дъга. Основни предимства на индиректните плазмотрони са малките размери и възможността за локално азотиране на детайлите, с което значително се понижават разходите и времето за протичане на процеса. При плазмено азотиране с индиректни плазмотрони обекта остава електронеутрален, като процеса протича при ниски температури ( $400\div 950^{\circ}\text{C}$ ) без претопяване на повърхността.

На фиг.1.13 е представена опростена блокова схема на електрическата част на апаратурата за напластяване АПН-50.



**Фиг.1.13. Захранване и управление на АПН-50.**

Икономически по-целесъобразно е да се използват източници със стръмно падаща ВАХ. Захранващите източници могат да имат падаща или стръмно-падаща външна ВАХ, която трябва да бъде съгласувана с ВАХ на дъгата на плазмотрона.

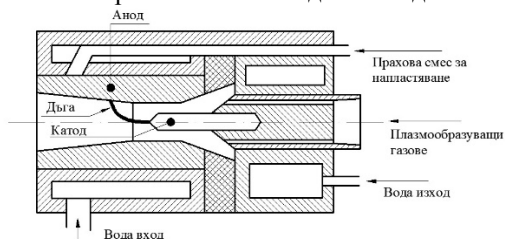
През плазмотрона циркулира дестилирана вода под високо налягане ( $0,8 \div 1,00 \text{ MPa}$ ) с разход  $15 \div 25 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . За нормалното функциониране на апаратурата за плазмено напластяване, голямо значение има своевременното подаване и точната дозировка на напластявания материал, което се осъществява с помощта на специални прахоподаващи устройства. В пулта за

управление са съсредоточени измервателни, регулировъчни и блокировъчни устройства (фиг.1.15), осигуряващи надеждна и безаварийна работа на апаратурата за плазмено напластяване.

Управлението на процеса се извършва от т.нар. колекторен блок с командно табло. Той е изработен като отделен блок и има връзка с всички системи от апаратурата. В колекторния блок са изведени всички регулиращи елементи за установяване на режима на апаратурата от веригите за управление и контрол, както и електронни и пневматични защиты, осигуряващи нормалното протичане на избрания режим на работа.

Влизания в състава на апаратурата плазмотрон е със самоустановяваща се дължина на дъгата, с един кръг на охлаждане. Подробни схеми на възлите на плазмотрона са показани в Приложение I.

Плазмотроните за напластяване за постоянно напрежение и вихрова стабилизация на дъгата обикновено се състоят от два основни възела – корпус и дюза. Към възела, съединен с положителната клема на източника на захранване се свързва сменяемата дюза-анод.



**Фиг. 1.16. Плазмотрон за напластяване**

С нарастването на температурата се увеличава топлосъдържанието на плазмата, затова при едноатомните газове (аргон, хелий), принос към енталпията имат само йонизацията и топлинното движение на атомите, докато при двуатомните и многоатомните молекули, има допълнителна енергия от процеса на дисоциация на молекулите. Това означава, че при една и съща температура, многоатомните газове имат по висока енталпия от едноатомните. Например, сухият въздух, водородът, азотът и кислородът имат голяма енталпия при ниски температури (двуатомни газове), докато аргонът и хелия (като едноатомни газове) се йонизират по-трудно и имат ниска енталпия при по-високи температури. Някои от важните характеристики на плазмената струя определящи развитието на процесите на пренос на енергията са: вискозитет, топлопроводимост, коефициент на топлопроводимост. Тези

параметри са в нелинейна зависимост от температурата респективно и енталпията на газа.

След адсорбцията на азотните атоми в повърхностния слой, високия химичен потенциал остава движеща сила за вътрешната дифузия в твърдата основна маса. Процесите на дифузия могат да се опишат с използване закона на Фик за дифузията и определените гранични условия.

За решение на дифузионното уравнение се обръща внимание на вътрешните връзки между атомите в твърдо състояние, където сходни атоми са подредени в проста кубична решетка. Ако съществува вероятност атом да прескочи на някое от съседните вакантни места, се получава мрежов поток атоми от районите с висока концентрация, към тези с ниска концентрация. Ако честотата на прескачане на атомите е  $\nu$  и междуатомното състояние в проста кристална решетка е  $\alpha$ , тогава прескачането на произволен атом води до вътрешен поток от атоми [17,28].

$$J = -(1/6\nu\alpha^2) \frac{dc}{dx} \quad (1.1)$$

Изразът в скобите е константа и определя потока за даден градиент на концентрация. Това е дифузионният коефициент  $D$ . След подходящо заместване се получава първия закон на Фик за дифузията:

$$J = D \frac{dc}{dx} \quad (1.2)$$

По същество честотата на прескачане на атомите  $\nu$  не е константа, дори за определена сплав. Това прави коефициента на дифузия съставна функция.

Първият закон на Фик за дифузията може да бъде приложен във всички случаи, като се ползва коефициента на дифузия. Този закон може да бъде използван за изчисляване композиционния състав на материали в установено състояние, когато състава във всички точки остава постоянен във времето. В повечето случаи се налага развитието на профил на състава като функция на времето. Необходимо е да се намери по-обективно уравнение, което да определи времезависимата дифузия.

Азотирането е неустановено състояние на дифузионния процес, при което концентрацията на азота на повърхността се увеличава с течение на времето. Този вид времезависима дифузия се описва с диференциално уравнение, което се нарича втори закон на Фик.

$$\frac{dc}{dt} = \frac{d}{dx}(J) = \frac{d}{dx} \left( -D \frac{dc}{dx} \right) \quad (1.3)$$

Това уравнение определя времезависимата промяна на дифузията еднородно или времезависимата промяна на градиента на местната

концентрация в това състояние на специфични материали /коэффициент на дифузия/. От това следва, че концентрацията е функция на времето. Ако се приеме, че  $D$  е константа /промените на  $D$  с концентрацията могат да се пренебрегнат/, уравнение (1.3) може да бъде упростено до:

$$\frac{dc}{dt} = -D \frac{d^2c}{dx^2} \quad (1.4)$$

При задаване на гранични условия, вторият закон на Фик може да представи аналитично нивото на концентрация. В процесът на навъглеродяване и азотиране, общите гранични условия се представят като:  $C = C_s$  при  $x=0$  /повърхностна концентрация/ и  $C = C_0$  при  $x = \infty$  /начална концентрация/. С приемане на  $D$  за константна величина се получава едномерно решение на диференциалното уравнение [12,17,28,107].

$$c_x = c_s - (c_s - c_0) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (1.5)$$

където  $c_s$  е константа на повърхностната концентрация,  $c_x$  е променлива концентрация на разстояние  $x$ , а  $c_0$  е изходната концентрация на дифундирали частици в твърдия образец. Изразът  $\operatorname{erf}$  означава функция на грешката, която е неопределен интеграл и се определя:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-y^2) dy \quad (1.6)$$

Коефициентът на дифузия на атомите  $D$ , следва зависимост по Архениус с енергия на активация, която е равна на енталпийната бариера на атомната миграция. Това може да бъде изразено с:

$$D = D_0 \exp(-Q / RT) \quad (1.7)$$

Много от процесите, протичащи в титана /разтворимост, стареене, термообработка и рекристализация/ са зависими от дифузията. Степените на дифузия на взаимносвързаните и заместващите легиращи елементи в  $\alpha$  и  $\beta$  титана са от голяма важност за намиране на подходяща повърхностна обработка.

Голям процент от данните за дифузионите процеси, протичащи в титана и неговите сплави са събрани през първите двадесет години от неговото използване като конструкционен материал /дифузия на кислород, алуминий и ванадий/. В последните години са натрупани много експериментални данни за дифузията на алуминия в титана и дифузията в  $\alpha$ -Ti(Al),  $\beta$ -Ti(Al) и междуметалните фази  $\alpha$ 2-Ti3Al и  $\gamma$ -TiAl. Резултатите от взаимната дифузия и

дифузията на примесите в тези фази и разширяване на изследванията в тази посока са от изключителна важност.

Самодифузията на титана в  $\beta$ -фаза е около три пъти по-бърза от тази в  $\alpha$ -фаза. Непрекъснатостта на кривата на Архениус в точката на трансформационната температура е уникален феномен за четирите показани елемента. Коефициентът на дифузия на заместващите елементи може да бъде по-голям /за Fe/ или по-малък /за Al/ от степента на самодифузия в титана. Най-висок коефициент на дифузия се наблюдава за атомите водород. Дифузионността на кислорода е много по-ниска от тази на водорода и пада значително с понижаването на температурата. Величината на всеки коефициент на дифузия е непрекъсната в точката на трансформационната температура.

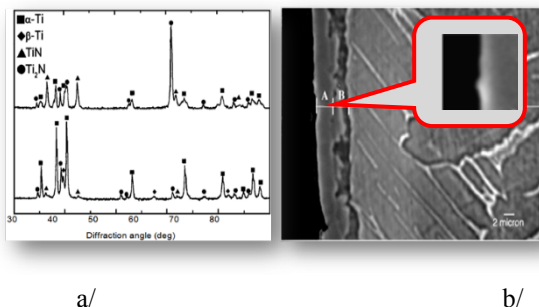
Дифузията на взаимно свързаните азотни атоми се повишава с повишаване температурата на образца. Дълбочината на дифузионната зона зависи от свободното количество азот, степента на концентрацията му, температурата, времето, състава на материала и състава на формираните динамични фази.

Дифузионната зона се състои от азот в твърдо състояние до момента, в който не бъде превишена границата на температурно зависимата разтворимост. Ако температурата превиши граничната стойност на разтворимостта се образуват нитриди. Взаимодействието на титана с азота е по-бавно, отколкото с водорода и кислорода и е все още в процес на изследване.

### Микроструктура и нарастване на азотираните слоеве

Основните фази, които се наблюдават на повърхността на различните титанови сплави след азотиране са TiN и Ti<sub>2</sub>N [91], които образуват съставни слоеве, покриващи цялата повърхност. Рентгеновата дифрактография и сканиращата микроскопия, показват наличието на TiN и Ti<sub>2</sub>N фази при плазмено азотирана сплав Ti-6Al-4V. На фиг. 1.23 ясно се различава границата между съставния и дифузионния слой. Под съставния слой се намира дифузионна зона, състояща се от твърди разтвори на азота в ХПО решетка на  $\alpha$ -титановата фаза. Структурата на дифузионната зона зависи от химичния състав на титановата сплав, както и от температурата на азотиране. Различните условия на азотиране оказват влияние върху повърхностните свойства на титана и титановите сплави. Основните параметри са температура, време, газова смес, скорост на подаване на газа, скорост на нагряване и охлаждане, налягане на газа, ток, напрежение, като всеки един от параметрите може да варира в зависимост от метода на азотиране.

С химико-термично обработване на титана и сплавите му, се разширява спектъра на приложение на този вид материали в областта на промишлеността и медицината. На газово азотиране могат да се подлагат различни детайли – от корпуси и детайли от автомобилната промишленост, включително и двигатели и финни машинни части, до различни видове импланти. Азотирането с високо налягане в чист азот, може успешно да се прилага при горивни инжекционни дюзи изработени от Ti-6Al-4V сплав.



**Фиг. 1.23.** Рентгенови дифрактографки линии на Ti-6Al-4V, плазмено азотирана за 6 часа (а-горе) 900°C и (а-долу) 700°C и (b) SEM микроструктура на Ti-6Al-4V, плазмено азотирана при 900°C за 6 часа.

Газово азотирания титан може да бъде разгледан като сериозен материал за изработване на дентални импланти и подвижни връзки в изкуствено създадени съединения в областта на биомедицината. Ортопедичните компании в САЩ и в Европа произвеждат азотирани или покрити с TiN бедрени импланти.

## ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

### *Системи за сбор на данни*

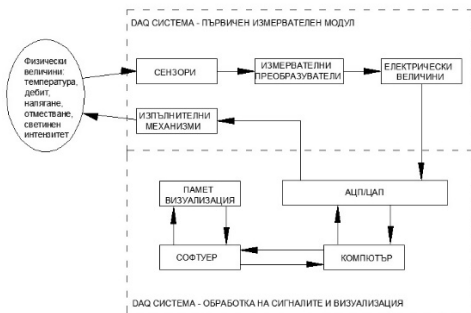
Сбор на данни (data acquisition - DAQ) е процесът, при който данните от определено физично явление или състояние се обработват и записват в реално време с възможност за понататъшна обработка, представяне и възпроизвеждане. В последните години при измерване на електрически и неелектрически величини в различни направления на техниката се налагат системите за сбор на данни или т.нар. DAQ системи. Те обезпечават физическата страна на този процес. Тяхното приложение не се ограничава само за конвенционални измервания. Те намират широка употреба и при изграждането на цялостна развойна система за осъществяване на пълен мониторинг, визуализация и контрол на различни по вид и характер процеси и

устройства. За да се постигне практическа и реална оценка на база опитни данни и резултати по отношение на стабилността и ефективността на една система за плазмено напаяване, е необходимо измерване в реално време на основни електрически параметри във възлови точки от електрическата схема на плазмената апаратура, както и адекватен подбор на средствата за измерване и за събиране на данни.

Основно такава една DAQ система има следните основни елементи:

- Първичен измервателен преобразувател (датчик, сензор);
- Краен изпълнителен механизъм;
- Съгласуващ блок;
- АЦП/ЦАП модул- средства за обработката, получаването и сбора на данните;
- Програмно обезпечение - софтуер за събиране, контрол и представяне на получените от АЦП/ЦАП модула данни.

Използваните сензори в DAQ системите генерират електрически сигнал на изхода си. Тези преобразуватели могат да бъдат класифицирани в различни групи: оптични, пиезоелектрични, капацитивни, магнито-електрични, тензодатчици, индуктивни, резистивни и т.н. Техните изходни сигнали могат да бъдат аналогови, цифрови, дискретни или импулсни. Тъй като получените електрически сигнали от първичните преобразуватели се различават значително по ниво е необходимо тяхното съгласуване преди цифровата им обработка в АЦП. Съгласуващия блок е съставен от измервателни преобразуватели (ИП), които имат строго определен коефициент на предаване, подходящи входно и изходно съпротивление, възможност за прецизна настройка на характеристиките и устойчивост на външни дестабилизиращи фактори (фиг.2. 1).



**Фиг.2.1. DAQ – система. Блок диаграма.**



Като измервателни преобразуватели, могат да бъдат използвани: делители на напрежение, амперклемци, шунтове, променливотокови преобразуватели (АС/АС) и др. За изследването на входната мощност на плазмотрона, токовете на трите фази могат да бъдат измерени чрез преобразуватели ток-напрежение, докато за напреженията се налага използване на преобразуватели, редуциращи трифазното променливо напрежение (АС/АС) и осигуряващи галванична развръзка със системата.

Като преобразуватели ток-напрежение са използвани преобразуватели тип ампер-клемци на фирмата Mastech модел MS-3300. Това са токови измервателни трансформатори със сърцевини от листова електротехническа стомана и датчик на Хол в магнитопровода. Величината на техния вход представлява магнитното поле около проводника на измервания ток, докато изходният сигнал е индуцирано напрежение пропорционално на този ток. Максималната стойност на измервателния диапазон достига до 1000А, като има възможност за измерване, както на променливи (работна честота 50-60Hz) така и на постоянни токове с точност до 3%. Коефициентът на преобразуване се дава с формулата:

$$K_{TH} = \frac{U_{изх}}{I_{вх}} = 1 \left[ \frac{mV}{A} \right]. \quad (2.1)$$

За редуциране стойността на измерваното трифазно напрежение до достигане границите на обхвата на аналоговите входове ( $U_{AI} = \pm 10V$ ), е конструиран АС/АС преобразувател. Измервателният му тракт се състои от две стъпала – трансформаторно понижаващо с товар високоомен резистивен делител и повторител изграден с ОУ с голямо входно съпротивление. Неговият външен вид и принципната му схема са показани в Приложение I. Схемата позволява редуциране на входния сигнал и галванична развръзка чрез трансформаторните входове (А, В, С) на измервателните канали, които са предназначени за измерване на фазови напрежения в трифазни вериги и имат обхват до 240V. Изходното напрежение се намалява 100 пъти.

Коефициентът на редукция на напрежението на АС/АС адаптера е произведение от коефициентите на предаване на трансформатора и делителя и се дава чрез израза:

$$K_P = K_{TP} \cdot K_D = \frac{U_{вх}}{U_{изх}} = 100, \quad (2.2)$$

където  $K_{TP}$  е коефициента на трансформатора, а  $K_D$  коефициента на делителя.  $K_P$  може да бъде регулиран в малки граници, чрез тримерите, разположени на входовете на операционните усилватели за прецизно установяване на неговата стойност. Захранването на чиповете на операционните усилватели е автономно и става чрез една от фазите с включването към трифазната мрежа за измерване.

За изчисление параметрите на трифазната верига, захранваща преобразувателя на плазмотрона, се измерват фазните й напрежения ( $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ ) и токове ( $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ ).

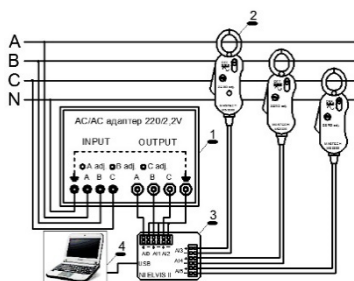
С тяхна помощ се пресмятат мощностите по фази, както и редица параметри, характеризиращи трифазните вериги: несиметрия, коефициент на нелинейни изкривявания (THD), дефазирание, фактор на мощността и др.

Така се установява мощността, въведена на входа на АПН-50. Наред с това с помощта на изходната електрическа мощност, изчислена чрез измерването на тока ( $I_T$ ) и напрежението ( $U_T$ ) върху плазмотрона, се определя електрическият КПД при симетрична захранваща електрическа верига. Това става чрез отношението:

$$\eta_E = \frac{U_T \cdot I_T}{3 \cdot U_A \cdot I_A} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

На фигура 2.2 е показана схемата на свързване на измервателната платформа NI ELVIS II към апаратурата за плазмено напластяване АПН-50 за измерване на входната трифазна мощност.

За измерване изходните параметри на системата ( $U_T$ ,  $I_T$ ) се използват съответните преобразуватели. За напрежението ( $U_T$ ) се използва делител на напрежение с регулируем коефициент на делене  $K_d$ . Поради спецификата на схемата за измерване на изходните величини на АПН-50, в DAQ системата се използват диференциални входове.



**Фиг. 2.2.** Измерване на входните електрически величини на АПН-50 чрез система за сбор на данни NI ELVIS II. 1- AC/AC адаптер, 2-преобразуватели ток-напрежение, 3-NI ELVIS II, 4-компютърна система с LabVIEW.

За симетриране на тези входове делителят се изпълнява като съставен от три последователно свързани резистора ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ), двата крайни от които ( $R_1$ ,  $R_3$ ) са еднакви, а напрежението се сема от средния резистор ( $R_2$ ) с много малко съпротивление спрямо резисторите  $R_1$  и  $R_3$ . Тогава коефициентът на описания делител може да се изрази чрез тези три резистора така:

$$K_d = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 + R_3} = 100 \quad (R_2 = 20,20k\Omega, R_1 = R_3 = 1M\Omega), \quad (2.4)$$

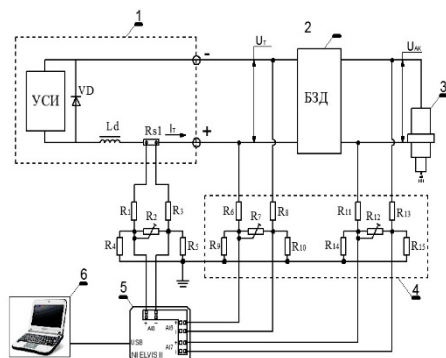
където  $R_1$  и  $R_3$  са стойностите на крайните съпротивления на делителя, а  $R_2$  на средния резистор. За прецизно настройване на делителя,  $R_2$  се изпълнява като хеликоидален тример. Друга особеност на измервателния тракт е голямото входно съпротивление на диференциалните входове на DAQ модула –  $1\text{G}\Omega$ . Така там се създават предпоставки за проникване и индуциране на силни външни влияния. Това може да бъде избегнато чрез добавяне на съпротивления със сравнително голяма стойност към двата извода на диференциалния вход (например от порядъка на  $100\text{k}\Omega$  до  $1\text{M}\Omega$ ), които да отвеждат външните въздействия към обща точка с най-нисък потенциал на схемата (например нулевия проводник на захранващата мрежа).

Токът  $I_T$ , може да бъде измерен чрез използването на шунта  $R_{S1}$ , с който е оборудвано захранването на АПН-50. Той е включен последователно в изходната верига на УСИ (Приложение II). Шунтът изпълнява роля на преобразувател на постоянния работен ток в напрежение, което лесно може да бъде измерено. Неговия коефициент на преобразуване  $K_{RS1}$  се дава с изказа:

$$K_{RS1} = \frac{U_{SH}}{I_{SH}} \left[ \frac{\text{mV}}{\text{A}} \right]. \quad (2.5)$$

Външният шунт има параметри:  $I_{SH} = 600\text{A}$  и  $U_{SH} = 60\text{mV}$ , което определя  $K_{RS1} = 0,1\text{mV/A}$ .

Схемата за измерване на изходните величини на АПН-50, посредством пасивни делители на напрежение е представена на фиг.2.3.



**Фиг.2.3. Схема за измерване на изходните електрически величини на АПН-50 чрез система за сбор на данни NI ELVIS II.1 - захранващ източник, 2 - блок за запалване на дъгата, 3 - плазмотрон, 4 - 6-канален делител на напрежение, 5 - NI ELVIS II, 6 - компютърна система с LabVIEW.**

В нея крайните резистори на делителите са:  $R_1$ ,  $R_3$ ,  $R_6$ ,  $R_8$ ,  $R_{11}$ ,  $R_{13}$ , докато полезният сигнал се отвежда към входовете на DAQ модула чрез:  $R_2$ ,  $R_7$ ,  $R_{12}$ . Резисторите  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $R_9$ ,  $R_{10}$ ,  $R_{14}$ ,  $R_{15}$  са добавени против индуциране на смущения. Тяхното включване слабо променя  $K_d$ , като това може да бъде компенсирано чрез тримерите, откъдето се получава сигнала ( $R_2$ ,  $R_7$ ,  $R_{12}$ ).

Въпреки всички гореизложени мерки за симетриране на схемата, поради производствените толеранси на елементите, на входовете на NI-DAQ се появява известна несиметрия, която умножена по  $K_d$  е значителна и може да доведе до грешни изчисления по отношение на ефективните и средните стойности на измерваните величини. Този проблем се отстранява чрез софтуерна филтрация, заложена в изпълнителния алгоритъм на програмите за обработка.

Снемането на данните в различните точки на една плазмена система предполага получаване на сигнали разнородни по характер и с голяма разлика в нивата. В захранващият блок с трансформатора например могат да се измерят напреженията на една трифазна система (230V/400V), БУЗ оперира основно с цифрови последователности с TTL нива (5V), както и аналогови управляващи сигнали, докато на електродите на плазмотрона и изхода на УСИ могат да се наблюдават напрежения със случаен или псевдопериодичен характер.

#### Общи данни за процесите в плазмотрона.

За настоящото измерване главен интерес представлява напрежението, получено на изхода на УСИ и приложено върху електродите на плазмотрона. В действителност то представлява измерване на потенциалната разлика между електроди, където се генерира електрическа дъга, която се обтича с плазмообразуваща смес от газове.

$$u_{ak}(t) = V_a(t) - V_k(t) \quad (2.6)$$

Тези условия са съпроводени с процеси, като топлообмен, поляризация и деполяризация, фазови преходи, конвекция, излъчване и т.н. Поради голямата им динамика и непредсказуемост, напрежението  $u_{ak}(t)$  по своя начин на развитие във времето може да бъде класифицирано като сигнал със случаен характер. То освен че отразява динамиката на процесите в плазмената камера, но също е и източник на информация за влиянието на конструктивните особености при проектирането на плазмотрона – габарити на камерата (диаметър, дължина), място и форма на отстъпа за самоустановяване на дъгата, брой и място на разположение на отворите на транспортния газ и праха и др. При различните режими на работа напрежението, получено при генериране на електродъговия разряд в камерата на плазмотрона, променя както основните си параметри (амплитуда, ефективна и средна стойност, фронтове на нарастване и спадане), но и изменя формата и динамиката си. В него обаче може да се забележи определена детерминираност в хода на развитието му във времето. Всичко това налага обработката на този сигнал да става чрез методите на математическата статистика и теорията на вероятностите.

В теорията на стохастичните процеси, един развиващ се във времето аналогов сигнал може да се разглежда като съставен от множество случайни стойности с безкрайно малко отстояние между тях. Този сигнал  $u(t)$  представлява функция на времето със случайни стойности. Чрез повторението на даден опит при равни условия, се получава една реализация, при която случайният сигнал получава различни форми като функции на времето -  $U_i(t)$ . Съвкупността от всички възможни реализации на случайния процес се нарича ансамбъл. Ансамбълът на случайния процес се счита зададен, ако са известни множеството реализации, както и вероятността за тяхната поява. При числената оценка на случайни величини се използват средни стойности, които отнесени към целия ансамбъл биват два вида – множествена и средна стойност по време. В общия случай тези две величини не са еднакви по стойност. По своята същност случайните сигнали могат да бъдат стационарни и нестационарни, ергодични и неергодични. Ако плътността на вероятностите на случайния процес е независима от началния момент на отчитане на времето, то процесът е стационарен.

$$f_X(x_1, t_1, \dots, x_n, t_n) = f_X(x_1, t_1 + \tau, \dots, x_n, t_n + \tau) = f_X(x_1) \quad (2.7)$$

В голям процент от стационарните процеси е приложима ергодическата хипотеза, според която средната стойност по време и множествената средна стойност са равни. Случайни сигнали, които притежават свойството ергодичност, могат да бъдат изследвани по-лесно, защото при тях не е необходимо наличието на целия ансамбъл от реализации, а само изследването на една единствена реализация за достатъчно продължителен период от време за намиране числените характеристики на случайния процес. В такъв случай може да се каже, че стационарни процеси, при които множественото усредняване и усредняването по време са еднакви се наричат ергодични.

### Статистически параметри на случайните процеси

Законите на разпределение и плътността на разпределение на случайния процес характеризират напълно случайния процес. Те изискват голям обем експерименти и статистически материал и са сложни по начин на определяне. В редица случаи не е толкова необходимо подробно описване на случайните процеси. В много практически ситуации е достатъчно изследването на по-прости статистически характеристики, като математическото очакване и дисперсията на случайния процес [66,67].

Средната стойност или математическото очакване  $\mu_X(t)$  на случайния процес  $X(t)$  се определя, като

$$\mu_X(t) = E\{X(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x, t)dx, \quad (2.8)$$

където  $E\{X(t)\}$  означава множествено усредняване. Математическото очакване определя някаква средна функция, около която се групират всички възможни реализации на случайния процес. Формула (2.8) е частен случай на по-общ израз, определящ началните моменти на случайния процес:

$$E\{X^n(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n f(x, t) dx, \quad (2.9)$$

Най-важни за практиката са началния момент от първи ред (за  $n=1$ ), който дефинира математическото очакване на случайния процес и началния момент от втори ред, който има вида:

$$E\{X^2(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f(x, t) dx, \quad (2.10)$$

Важността на началния момент от втори ред произтича от факта, че той често се интерпретира, като усреднен по време квадрат на напрежение или ток, при което е пропорционален на средната мощност.

Освен това се въвежда понятието централен момент от  $n$ -ти ред, който се описва с изказа:

$$E\{[X(t) - E\{X(t)\}]^n\} = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - E\{X(t)\}]^n f_X(x, t) dx, \quad (2.11)$$

Вторият централен момент е получил наименованието дисперсия на случайния процес и се определя като математическото очакване на квадрата на отклонението на процеса от неговата средна стойност:

$$\sigma_X^2(t) = E\{[X(t) - E\{X(t)\}]^2\} = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - E\{X(t)\}]^2 f_X(x, t) dx \quad (2.12)$$

Дисперсията е мярка за разсейването на стойностите на случайната величина около средната стойност. Ако средната стойност на случайния процес е нула, то дисперсията съвпада с математическото очакване на квадрата на случайния процес:

$$\sigma_X^2(t) = E\{X^2(t)\} \quad (2.13)$$

Средната стойност и дисперсията характеризират поведението на случайния процес в отделни моменти от времето. Величината  $\sigma_X(t)$  се нарича средно квадратично отклонение или стандартно отклонение и е равна на корен квадратен от дисперсията.

Разгледаните статистически характеристики имат ясна физическа интерпретация в теорията на сигналите. Така например математическото очакване е равно на постоянната съставна на случайно изменящо се напрежение или ток. Дисперсията от своя страна представлява средната мощност на променливата съставна на това напрежение или ток. Ако разглежданият случаен процес е стационарен, то математическото очакване  $\mu_X(t)$  и дисперсията  $\sigma_X^2(t)$  не зависят от времето, т.е. за произволни моменти на времето  $t_1$  и  $t_2$  са в сила равенствата:

$$\sigma_X^2(t_1) = \sigma_X^2(t_2) = \sigma_X^2(t) \quad \text{и} \quad \mu_X(t_1) = \mu_X(t_2) = \mu_X(t) \quad (2.14)$$

Допускането за ергодичност позволява множественото усредняване да се замени с усредняване по време [65]. Тогава изразите за математическото очакване и дисперсията добиват вида:

$$\mu_X = E[X] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2.15)$$

$$\sigma_X^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_X]^2 dt \quad (2.16)$$

*Точкови и интервални оценки на средната стойност и дисперсията*

В много практически ситуации се налага да се работи с ергодични дискретни случайни процеси, при което се изследват реализации с крайна дължина. Дължината  $N$  на реализацията на случайния процес се нарича обем на реализацията, а средна стойност и дисперсията се дават с изразите

$$m = \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(i) \quad (2.17)$$

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} [x(i) - \bar{x}]^2 \quad (2.18)$$

При допускането за ергодичност на случайния процес така дефинираните средна стойност и дисперсия са точкови оценки на съответните действителни величини  $\mu_X$  и  $\sigma_X^2$  понеже са изчислени за единствена реализация с ограничена (крайна) дължина. Освен точкови оценки, в статистическите изследвания често се използват т. нар. интервални оценки. Тези оценки гарантират, че оценяваният параметър, с определена вероятност приема стойности в даден интервал, наречен доверителен интервал. Интервалът от стойности в границите на който оценката попада с вероятност  $[\alpha/100]\%$ , се нарича  $\alpha\%$  доверителен интервал, границите на интервала - доверителни, а  $\alpha$  - доверително ниво. Обикновено се използват стойности на вероятността в границите на 0.9 – 0.99, при което преминаването в проценти дава стойности в границите на 90 % - 99 %.

За достатъчно голяма дължина на реализацията на случайния процес, примерно  $N > 40$ , доверителното ниво за точковата оценка  $m$  се определя посредством неравенството:

$$\mu_X - \frac{k\sigma}{\sqrt{N}} \leq m \leq \mu_X + \frac{k\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (2.19)$$

където  $k$  е константа, която зависи от параметъра  $\alpha$  и плътността на разпределението на реализацията на случайния процес.

Корелационната функция изразява степента на статистическа зависимост между стойностите на даден случаен процес или двойка процеси в моментите на времето  $t_1$  и  $t_2$ . В първия случай се дефинирана т.нар. автокорелационна функция (АКФ) на случайния процес, а във втория случай - взаимнокорелационната функция (ВКФ) на двойка случайни

процеси. Ако  $X(t)$  и  $Y(t)$  са два случайни процеса, тогава АКФ на процеса  $X(t)$  се определя, като математическото очакване на произведението на процеса в двойка моменти на времето, т.е.

$$R_X(t_1, t_2) = E\{X(t_1)X(t_2)\}. \quad (2.20)$$

Аналогично се определя ВКФ  $R_{XY}(t_1, t_2)$  на двойка случайни процеси:

$$R_{XY}(t_1, t_2) = E\{X(t_1)Y(t_2)\}. \quad (2.21)$$

В случай, че АКФ на даден случаен процес зависи само от разликата  $\tau = t_2 - t_1$ , т.е.

$$R_X(t_1, t_2) = R_X(t_2 - t_1) = R_X(\tau), \quad (2.22)$$

а математическото очакване не зависи от времето

$$E\{X(t)\} = \mu_X = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx, \quad (2.23)$$

то такъв случаен процес се нарича стационарен в широк смисъл. За стационарните случайни процеси в голяма част от случаите е в сила свойството ергодичност, при което множественото осредняване може да се замени с осредняване по време. Тогава са в сила изразите

$$R_X(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt, \quad (2.24)$$

$$R_{XY}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt. \quad (2.25)$$

За АКФ може да се отбележи че АКФ е намаляваща функция на аргумента  $\tau$  и при  $\tau \rightarrow \infty$  стойността  $R_X(\infty)$  се стреми към квадрата на постоянната съставна, докато при  $\tau = 0$  АКФ е числено равна на средната мощност на процеса, т.е.  $R_X(0) = P_X$ . За разкриване на скрита периодичност в случайния сигнал от особена важност е това, че АКФ на периодичен случаен процес е периодична функция с период, равен на периода на процеса, т.е.

$$R_X(\tau) = R_X(\tau+T).$$

Нормираната корелационна функция (или коефициент на корелация) се дава с израза:

$$\rho_X(\tau) = \frac{R_X(\tau)}{R_X(0)}. \quad (2.26)$$

Нормираната корелационна функция приема стойности в интервала от  $-1$  до  $+1$ , т.е.  $0 \leq |\rho(\tau)| \leq 1$ . За  $|\rho(\tau)| \approx 1$  корелацията е силна, а при  $|\rho(\tau)| \approx 0$  - слаба.

### Връзка между АКФ и енергийния спектър на случаен процес

При наблюдението на даден случаен процес е възможно определянето единствено на текущия спектър на реализацията  $x_T(t)$ , т.е.

$$x_T(\omega) = \int_0^T x_T(t)\exp(-j\omega t)dt. \quad (2.27)$$

Средната мощност на реализацията  $x_T(t)$  и спектралната плътност  $x_T(\omega)$  са свързани посредством равенството на Парсевал. Тогава можем да запишем



$$P_T = \frac{1}{T} \int_0^T |x^2(t)| dt = \frac{1}{2T} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|X(\omega)|^2}{T} d\omega, \quad (2.28)$$

където подинтегралната функция

$$G_T(\omega) = \frac{|X(\omega)|^2}{T} \quad (2.29)$$

се нарича спектрална плътност на мощността или енергиен спектър и има размерност W/Hz.  $X_T(\omega)$  и  $G_T(\omega)$  представляват случайни функции на честотата. За получаването на неслучайна функция на честотата  $G(\omega)$  е необходимо да се осъществи граничен преход  $T \rightarrow \infty$  и множествено усредняване  $E\{G_T(\omega)\}$  на реализациите  $G_T(\omega)$ . Тогава за спектралната плътност на мощността на случайния процес се получава

$$G(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} E\{G_T(\omega)\} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\{X_T(\omega)\}^2}{T}. \quad (2.30)$$

Формула (2.30) позволява определянето на спектралната плътност на мощността на произволен случаен процес. От друга страна за ергодични случайни процеси множественото усредняване може да се замени с усредняване по време. За такива случайни процеси  $G(\omega)$  може да се определи по единствена реализация на случайния процес, при което

$$G(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|X_T(\omega)|^2}{T}. \quad (2.31)$$

Енергийният спектър на стационарен случаен процес може да се определи и посредством спектъра на неговата АКФ:

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau. \quad (2.32)$$

Обратното преобразуване на Фурие дава АКФ на случайния процес, т.е.

$$R_x(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) \exp(j\omega\tau) d\omega. \quad (2.33)$$

Формули (2.32) и (2.33) изразяват теоремата на Винер-Хинчин, която показва, че за стационарни случайни процеси енергийния спектър и АКФ са взаимосвързани чрез преобразуване на Фурие.

### Стационарност и ергодичност

За достоверност на получените резултати при работа с АПН-50, е необходимо да се направи проверка за стационарност на изследваните сигнали. Стационарността на случайния процес се установява с помощта на инверсен критерий. Това е непараметричен критерий неизискващ да се познава разпределението на случайната величина. Процедира се по следния начин. Всяка реализация на напрежението се дискретизира на  $N$  стойности. Определя се броя на случаите, за които за случайната величина  $X$  е изпълнено условието  $x_i > x_j$  за  $i > j$ . Всяко такова неравенство се нарича инверсия  $A_i$ . Общия брой инверсии е  $A$ , като:

$$A = \sum_{i=1}^N A_i, \text{ където: } A_i = \sum_{j=i+1}^N h_{ij}; \quad h_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } x_i < x_j \\ 0 & \text{при } x_i > x_j \end{cases} \quad (2.34)$$

При ниво на значимост  $\alpha=0,05$  се повдига нулева хипотеза  $H_0$  за стационарността на случайния процес. Хипотезата не се отхвърля, ако е изпълнено условието:

$$A_N; (1-\alpha/2) \leq A \leq A_N; \alpha/2 \quad (2.35)$$

При изследването на случайни процеси се дефинира и понятието ергодичност. Силно ергодични са процесите, при които за всички вероятностни характеристики усредняването по множеството реализации (по ансамбъл) дава същия резултат като усредняването по време на една безкрайно дълга реализация. Процесът е слабо ергодичен, когато това е в сила само за математическото му очакване  $\mu_x$ , дисперсията  $\sigma_x^2$  и корелационната му функция  $R_x(\tau)$ . За нормално разпределени случайни величини слабата ергодичност съвпада със силната. Свойството ергодичност дава възможност да се измери и анализира само една реализация от целия ансамбъл, което значително опростява изследването.

Достатъчните условия за ергодичност на случайните процеси са: те да са слабо стационарни и АКФ да клони към нула, когато  $\tau \rightarrow \infty$  т.е. да бъде изпълнено условието:

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} R_x(\tau) = 0. \quad (2.36)$$

Физически това означава, че при неограничено нарастване на интервала  $\tau$ , случайните величини  $x(t)$  и  $x(t+\tau)$  стават независими, а следователно и некорелирани.

При затихваща корелационна функция може да се установи такава стойност за  $\tau$ , от която нататък АКФ има пренебрежимо малки нива. Тази стойност се нарича интервал на корелация -  $\tau_k$ . На практика корелационната функция се смята за затихнала, ако е изпълнено условието  $|R_x(\tau)| < \delta$  за  $\tau > \tau_k$ , като  $\delta$  се задава в границите  $\delta=(0,05 \div 0,1)$ .

Всеки стационарен случаен процес притежава свойството ергодичност, ако усреднените му времеви и ансамблови характеристики са равни. В такъв случай, ако това е изпълнено за напрежението  $U_{AK}$  и токът  $I_T$  са в сила равенствата:

$$U_{AKcp} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T U_{AKn}(t) dt, \quad (2.37)$$

$$\sigma_{U_{AK}}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (U_n(t) - U_{cp})^2 dt, \quad (2.38)$$

$$R_{U_{AK}}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (U_n(t) - U_{cp})(U_n(t + \tau) - U_{cp}) dt, \quad (2.39)$$

$$I_{Tcp} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T I_{Tn}(t) dt, \quad (2.40)$$

$$\sigma_{I_T}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (I_{Tn}(t) - I_{Tcp})^2 dt, \quad (2.41)$$

$$R_{I_T}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (I_{Tn}(t) - I_{Tcp})(I_{Tn}(t + \tau) - I_{Tcp}) dt, \quad (2.42)$$

изчислени като средни стойности във времето за коя да е произволна  $n$ -та фиксирана реализация на стационарния случаен процес. Следователно, стационарните случайни процеси за  $U_{AK}(t)$  и  $I_T(t)$  са ергодични, ако техните числови характеристики, намерени чрез усредняване на множеството реализации за определен момент  $t$ , съвпадат със съответните такива за кои да са реализации  $U_{AKn}(t)$ ,  $I_{Tn}(t)$ , наблюдавани в достатъчно дълъг интервал от време  $T$ .

### Софтуер и използвани програми за мониторинг и обработка на данните

Софтуерният продукт LabVIEW е разработен, за да обезпечи широката гама инструменти на производителя. Той дава възможност за осъществяване на всички етапи за един цялостен мониторинг: измерване, обработка, управление, контрол, запис и визуализация на получените данни. LabVIEW е софтуер с графично-ориентиран метод на програмиране. Той разполага с богат набор от библиотеки и инструменти и поддържа промишлени интерфейси за някои от най-широко използваните протоколи за контрол, следене и измерване. Едно от предимствата на продукта е възможността за създаване на виртуални инструменти или проекти. Обикновено те се състоят от пакет програми с йерархична структура, решаващи даден проблем, контролиращи обект, процес или пък осъществяват в реално време измерване или мониторинг на функционираща система.

Всяка една от програмите в средата на LabVIEW се състои от блок схема и контролен панел. Потребителския интерфейс на софтуера е графичен и се осъществява посредством контролен панел. В него намират израз всички виртуални инструменти от рода на: индикации, графични визуализации, контролни уреди, сигнализиращи елементи, етикети, указващи и пояснителни бележки. Изпълнителният алгоритъм, указващ действието на самата програма се изразява чрез блок схема в отделен прозорец, съпътстващ контролния панел.

### Измерване и запис на входните и изходните напрежения и токове.

Разработена е програма с помощта, на която се визуализират токовете и напреженията в трите фази на захранващия източник на АПН-50. Освен това в програмата е включен инструмент за бързо преобразуване на Фурие (FastFourierTransformation - FFT) на входните сигнали и в честотна област се оценява спектъра на всички входни въздействия. Чрез пренастройване на DAQ модула програмата се прилага и за измерване на случайните по характер сигнали, генерирани на електродите на плазмотрона. Поради случайния

характер на сигналите на изводите на АПН-50 в програмата е заложен цикъл, осъществяващ многократно измерване, с чиято помощ се осъществява проверката за стационарност на изследваните сигнали. Чрез измерените моментни стойности в определен отрязък от време, се изчисляват амплитудната и ефективната стойност на сигнала, а чрез инструмента за FFT се определят нивата на висшите хармоници явяващи се в изследвания сигнал. При измерването на трифазно напрежение се определя и коефициента на несинусоидалност в захранващата верига на плазмотрона.

За изключване на високочестотни смущаващи влияния и дрейф, изследвания сигнал се филтрира в определена честотна лента чрез лентов филтър (ЛФ).

Необходимата проверка за стационарност на получените сигнали се осъществява чрез гореописаните методи и направените многократни измервания. В програмата е заложен алгоритъм за няколкократно измерване на случайни реализации и възможност за тяхното сравнение и усредняване в рамките на изследвания режим на АПН-50. Чрез намирането на средната стойност на определен статистически параметър, се определя отклонението за съответния параметър при всяка една реализация от средната стойност на изследваната извадка. Дисперсия в рамките на допустимата инструментална грешка характеризира процеса като стационарен.

## ***ИЗВОДИ***

Чрез използваната апаратура за плазмено напластяване АПН-50 със съответния плазмотрон и захранващ източник, могат да бъдат снети основните електрически величини и оценени важни характеристики и параметри на процеса - стабилност и ефективност.

Използваната многоканална система за сбор на данни NI-DAQ, дава възможност адекватно, точно и едновременно да се измерят и запишат всички необходими сигнали и техните флуктуации за да се оцени стабилността на дъгата и ефективността на процеса.

Предвид типа на измерваните сигнали, които имат случаен характер, използваните методики за обработка на данните гарантират адекватност и достоверност на получените резултати.

Разработеният пакет от програми в среддата на LabVIEW са надежден и точен инструмент в целия процес на измерване, обработка, оценка и представяне на резултатите, както и изчисление на изследваните параметри.

Избраният оптимален план ( $B_m$ ) гарантира простота и адекватност при оптимизацията на процеса и оценката на влияещите фактори при

разработването на математичен модел за представяне целевите параметри на процеса при ПФЕ.

### ГЛАВА 3. ИЗСЛЕДВАНЕ СТАБИЛНОСТТА И ЕФЕКТИВНОСТТА НА АПАРАТУРА ЗА ПЛАЗМЕНО ПРАХОВОТО НАПЛАСТЯВАНЕ АПН-50

*Основни фактори, влияещи върху стабилността на електрическата дъга и ефективността на плазмено праховото напластяване.*

Изходните материали за плазмено прахово напластяване в зависимост от технологията, оборудването и начина на тяхното използване претърпяват различни физико-химични превръщания, поради което в повечето случаи свойствата на получените покрития се различават от свойствата на основния материал. Върху качествата на покритията нанесени по метода на плазмено праховото напластяване влияят редица фактори, броят на които според оценките на различни автори се движи от 15 до 35.

Топлообменът на плазмената дъга с околната среда определя преимуществено термодинамичното ѝ равновесие. Той оказва влияние върху ресурса на работа на катода и анода в плазмотроните за напластяване. Контактът на горещата плазма със стените на катода и анода в плазмотроните води до изпарение на електродния материал, поради което плазмата се насища с примеси. Топлообменните процеси с околната среда стават посредством конвективен и лъчист топлообмен. В тази насока от особено значение е пространствената стабилизация на дъгата.

Газовихровата стабилизация на дъгата е един от ефективните и разпространени способности използващи се в плазмотроните за напластяване. Идеята се заключава в следното: ако в неподвижна течност или газ съществува градиент на налягането, то тя се насочва в направление на намаляване на налягането. Под действието на центробежните сили възниква насочен по радиуса градиент на налягането. Тъй като най-малкото налягане ще е по оста, то газът ще заеме устойчиво положение около оста. При отклонение от оста при възникване на разлика в налягането се появяват сили, които го връщат обратно към центъра. Ако в центъра има плазма, а относително хладния газ се движи тангенциално около нея, възниква голяма разлика в плътността на хладния газ и плазмата. Поради това плазмената дъга заема устойчиво положение по оста, а относително хладния газ се разполага около дъгата и стените на дюзата в плазмотрона.

Формата и размерите на електродъговата камера и канала на дюзата оказват съществено влияние за добра стабилизация на дъгата в плазмотроните за напластяване. Когато каналът на дюзата е много по-голям, отколкото електропроводящия диаметър на дъгата, интензивността на охлаждане на

дъгата чрез стените на плазмотрона е по-малка, градиентът на температурата в напречно направление ще е по-малък, зародилите се напречни колебания на дъгата ще се разпространяват по-лесно, поради което пространствената устойчивост на дъгата ще е по-малка.

Формата и геометричните размери на дюзата-анод са важни за протичането на процесите на напластяване. При едни и същи технологични условия с изменение формата и размерите на дюзата може да се варира с температура на плазмата и скоростта на изтичане на плазмената струя.

Дължината на дюзата се определя от вида на работния газ, характера на изтичане на началния участък на дюзата, началната скорост на газа, неговият разход и налягане, силата на тока, използвания метод на стабилизация на дъгата и други. Постъпващият в работната камера газ по дължината на оста на дюзата на плазмотроните за напластяване, се нагрява от електрическата дъга, в резултат на което диаметърът на дъгата постепенно се увеличава. Поради интензивното охлаждане стълба на дъгата не може да се разшири до стените на дюзата. Фактически между тях винаги се намира студен слой неелектропроводящ газ. В тази зона протичат процеси играещи решаваща роля за механизма на шунтиране на дъгата. Най-важни от тях са възбуждане и йонизация на газа в резултат на излъчване, на сблъскване между частиците, под действие на силно електрическо поле от напречни колебания на стълба и др. Тези фактори способстват за намаляване електрическата устойчивост на газа и създаване на благоприятни условия за пробив на промеждутъка катод (волфрамов електрод) - стълб на дъгата-анод (дюза) в плазмотроните за напластяване индиректен тип.

Стабилността на работа на плазмотроните се определя от способността на основните възли – анод и катод да съхраняват изходната форма на работния си участък при минимална загуба на електроден материал. Скоростта на подаване на плазмообразуващите газове може да се регламентира от газоразпределителната втулка в плазмотроните за напластяване.

Анализа на получените резултати показва, че скоростта на плазмообразуващия газ в голяма степен влияе при избора на схема за газова стабилизация на дъгата. В плазмотроните за напластяване при малък разход на газ по-удачна е осевата схема на стабилизация, а при необходимост от по-голям разход на газ - газовихровата стабилизация на дъгата.

За всеки модел плазмотрон, където конструкцията е точно определена и конструктивните параметри са фиксирани, от значение за стабилността на дъгата и ефективността на процеса са технологичните параметри. Разгледана е ролята на различните плазмообразуващи газове и тяхното влияние в процеса на плазменопрехово напластяване. В резултат на анализа за целите на

изследването са избрани два плазмообразуващи газа: аргон като основен и транспортен и азот като допълнителен.

Дебитът на транспортен газ като цяло е под 5-7% от този на плазмообразуващите газове. При граници на вариране на този фактор в рамките дори на 50% от основното му ниво, то следва да се получи изменение под 5% в сравнение с цялото количество газ преминало през дюзата на плазмотрона. Това означава, че при планирането на експеримента, факторът е с малка тежест и може да се пренебрегне.

### Определяне коефициентите на регресия в математическия модел при ПФЕ.

За получаване на математическия модел е избран оптимален композиционен план В4. Диапазонът на изменение на факторите има три основни нива – долно, основно и горно. Избира се среден интервал на вариране на факторите и са направени извадки от девет паралелни опита. Като съществени влияещи фактори са избрани факторите  $x_1 - x_4$  от таблица 3.1, които са с най-голямо влияние.

В таблица 3.2 са дадени нивата на изменение и интервала на вариране на съществениите фактори.

| Таблица 3.2 Интервали и нива на вариране на съществениите фактори |       |                       |                 |                 |                |
|-------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| Фактор                                                            |       | Интервал на изменение | Долно ниво (-1) | Средно ниво (0) | Горно ниво (1) |
| $x_1 (I_T)$                                                       | A     | 100                   | 300             | 400             | 500            |
| $x_2 (Q_{Ar})$                                                    | l/min | 10                    | 20              | 30              | 40             |
| $x_3 (Q_N)$                                                       | l/min | 2                     | 0               | 2               | 4              |
| $x_4 (Q_{Ni})$                                                    | gr/h  | 400                   | 0               | 400             | 800            |

Броят на опитите на план В4 е  $N = 24$ . Броят на коефициентите в модела е  $k = 15$ . Броят на факторите е избран  $m = 4$ . Матрицата на планиране за план В4 е дадена в таблица 4.2 на приложение II.

Моделът на план В4 може да се изрази с полинома

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^4 b_{ii} x_i^2. \quad (3.1)$$

Като се разкрият сумите, изразът (3.1) придобива вида:

$$y = b_0 + b_1 \dot{x}_1 + b_2 \dot{x}_2 + b_3 \dot{x}_3 + b_4 \dot{x}_4 + b_{12} \dot{x}_1 \dot{x}_2 + b_{13} \dot{x}_1 \dot{x}_3 + b_{14} \dot{x}_1 \dot{x}_4 + b_{23} \dot{x}_2 \dot{x}_3 + b_{24} \dot{x}_2 \dot{x}_4 + b_{34} \dot{x}_3 \dot{x}_4 + b_{11} \dot{x}_1^2 + b_{22} \dot{x}_2^2 + b_{33} \dot{x}_3^2 + b_{44} \dot{x}_4^2 \quad (3.2)$$

Оценките на регресионните коефициенти се изчисляват чрез матричното умножение:

$$B = [FT.F]^{-1}.FT.Y \quad (3.3)$$

или опростените скаларни формули:

за свободния член:

$$b_0 = a \sum_{u=1}^N y_u + p \sum_{j=1}^m \sum_{u=1}^N \dot{x}_{ju}^2 y_u \quad (3.4)$$

за коефициентите на линейните членове:

$$b_i = e \sum_{u=1}^N \dot{x}_{iu} y_u \quad (3.5)$$

за коефициентите на взаимодействия:

$$b_{ij} = g \sum_{u=1}^N \dot{x}_{iu} \dot{x}_{ju} y_u \quad (3.6)$$

за коефициентите на квадратичните членове:

$$b_{ii} = c \sum_{u=1}^N \dot{x}_{iu}^2 y_u + d \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \sum_{u=1}^N \dot{x}_{ju}^2 y_u + p \sum_{u=1}^N y_u \quad (3.7)$$

След решение на матричното уравнение (3.3) се намират коефициентите от вектора **B** на модела (3.1). По-долу са показани стойностите на векторите **B** за двата основни параметъра в изследването – стабилност на дъгата и ефективност на процеса. За ефективността коефициентите изразяват изходната електрическа мощност тъй като тя е определяща за ефективността. Това е така поради факта, че входната електрическа мощност при изследваните режими е константна и ефективността на преобразуване на енергията се изразява чрез мощността отделена от източника (УСИ).

За стабилността на дъгата, коефициентите в матрицата **B** изразяват динамичното съпротивление, изразено в милиомове (mΩ). Поради слабото влияние на източника на напрежение (неговото динамично съпротивление клони към нула  $R_{\text{дуси}} \rightarrow 0$ ) значение за  $K_{\text{ст}}$  има динамичното съпротивление на дъгата. Коефициентите в този случай са:

$B = [233,063; -49,6111; 11,1111; -33,0556; 1,16667; -13,5625; -8,8125; -5,4375; 4,3125; 9,9375; -14,0625; 16,9375; 5,4375; 5,9375; 1,9375]$ .

Тогава след пресмятане на регресионните константи полиномът на модела за ефективността придобива вида:

$$\begin{aligned} y_{\text{кпд}} = & 12563 + 3335\dot{x}_1 + 1243,33\dot{x}_2 + 3886,67\dot{x}_3 + 63,33\dot{x}_4 + \\ & 461,875\dot{x}_1\dot{x}_2 + 939,375\dot{x}_1\dot{x}_3 - 10,625\dot{x}_1\dot{x}_4 - 240,625\dot{x}_2\dot{x}_3 + 131,875\dot{x}_2\dot{x}_4 - \\ & 45,625\dot{x}_3\dot{x}_4 + 586,458\dot{x}_1^2 - 468,542\dot{x}_2^2 + 861,458\dot{x}_4^2 - 1078,54\dot{x}_4^2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Аналогично за стабилността на дъгата моделът е:



$$y_{\text{Кст}} = 233,063 - 49,611\dot{x}_1 + 11,111\dot{x}_2 - 33,056\dot{x}_3 + 1,167\dot{x}_4 - 13,563\dot{x}_1\dot{x}_2 - 8,813\dot{x}_1\dot{x}_3 - 5,438\dot{x}_1\dot{x}_4 + 4,313\dot{x}_2\dot{x}_3 + 9,938\dot{x}_2\dot{x}_4 - 14,063\dot{x}_3\dot{x}_4 + 16,938\dot{x}_1^2 + 5,438\dot{x}_2^2 + 5,938\dot{x}_4^2 + 1,938\dot{x}_4^2 \quad (3.9)$$

За проверката за адекватността на моделите са необходими: броят на опитите от матрицата на модела ( $N=24$ ), броят на коефициентите в регресионното уравнение ( $k=15$ ) и броят на проведените опити за даден режим ( $n=9$ ). Тогава по броят на степените на свобода  $\nu = N-k = 9$  и чрез проведените опити в една точка от плана –  $n-1 = 8$ , от таблица 4.3 на приложение II се установява табличното значение на коефициента на Фишер –  $F_T$  при ниво на значимост  $\alpha=0,05$ . За двата модела се установява таблична стойност на коефициента на Фишер  $F_T=3,4$ . Изчислението на действителната стойност на този коефициент става чрез израза:

$$F = \frac{(n-1) \sum_{u=1}^N (y_u - \bar{y}_u)^2}{(N-k) \sum_{u=1}^n (y_u - \bar{y})^2} \quad , \quad (3.10)$$

$$\text{където: } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_u \quad .$$

Моделът се приема за адекватен при:

$$F < F_T. \quad (3.11)$$

За модела на ефективността се изчислява коефициент на Фишер –  $F_{\text{кпд}} = 2,27$ , докато съответният коефициент за модела на стабилността на дъгата е  $F_{\text{Кст}} = 1,70$ .

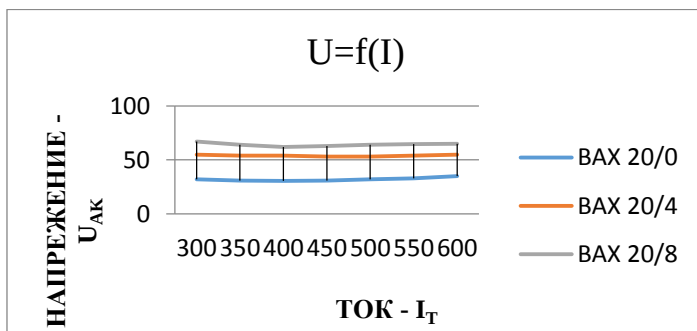
От направените изчисления се доказва адекватността и на двата модела, тъй като се изпълнява условие (3.11).

### Волтамперна характеристика на източника и изходна мощност.

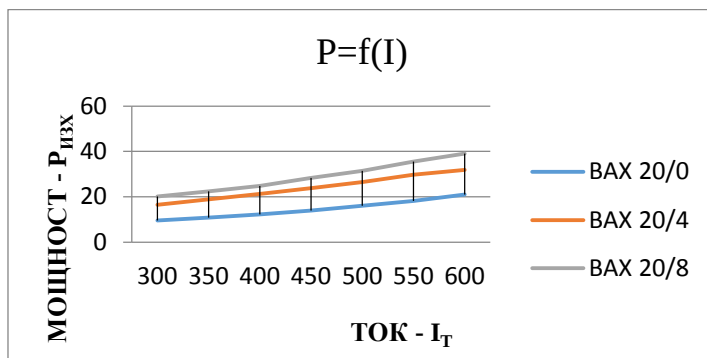
За определяне особеностите на режима е необходимо предварително да се знае работната точка от ВАХ на изправителя. По този начин става възможно да се снимат статичните и динамични характеристики на режима.

ВАХ е снета при стойности на вариране на съществените фактори в широки граници. За фактор  $x_2$  ( $Q_{Ar}$ ) границите са определени от 20 l/min до 50 l/min, докато за фактор  $x_3$  тези гранични стойности са 0 l/min до 8 l/min. Показана е и мощността, измерена на изхода на УСИ при всички нива на вариране на основните фактори. Графиките, отразяващи данните в таблица 3.4 са представени на фигури 3.1 – 3.4. Фигура 3.1 представя ВАХ на източника при различни нива на дебит на азота. Вижда се, че УСИ има характеристика на източник на напрежение, като нивото на отдаваната мощност нараства с

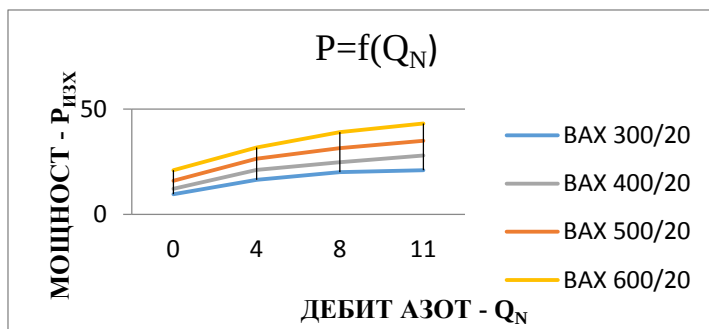
увеличаване на дебита на азота ( $x_3$ ) като плазмообразуващ газ. Фигури 3.2 - 3.4 показват факторите оказващи влияние на изходната мощност. От тях се установява, че от режимните параметри най-силно влияние върху изходната мощност оказва дебита на азот ( $x_3$ ) както и работния ток, което е очаквано, тъй като в израза за мощността той е в пряка зависимост с нея. В по-малка степен изходната мощност се изменя при промяната дебита на основния плазмообразуващ газ – аргона. Нарастването на  $P_{\text{изх}}$  е незначително при двукратно и трикратно увеличение на дебита. Това се обяснява с ниската енталпия на аргона в сравнение с тази на азота (Приложение I).



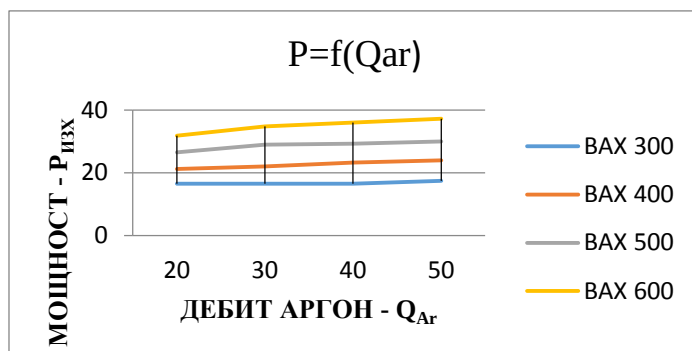
Фиг.3.1. ВАР на УСИ при  $Q_{Ar} = 20$  l/min и  $Q_N = 0-8$  l/min.



Фиг.3.2. Консумирана мощност в зависимост от работния ток при  $Q_{Ar} = 20$  l/min и  $Q_N = 0-8$  l/min.



Фиг.3.3 Консумирана мощност в зависимост от дебита на азот при  $Q_{Ar} = 20$  l/min и  $I_T = 300-600A$



Фиг.3.4. Консумирана мощност в зависимост от дебита на аргон при  $Q_N = 4$  l/min и  $I_T = 300-600A$

#### Коефициент на полезно действие.

Консумираната мощност от АПН-50 се разделя на две основни части: полезна – участваща пряко в процеса на напластяване - генерирането на плазма, разтопяването на праха за напластяване и нанасянето му върху детайла и загубна, която не е пряко свързана с напластяването – поддържа основните процеси и нормалната работа на апаратурата,

Полезната мощност се определя от:

Енергия за плазмообразуване – включва йонизационната и отделителната работа при генерирането на плазма от въведените газове. Тя е енергоемка защото включва фазовия преход газ-плазма.

Енергия за разтапяне на праха за напластяване – също включва енергия на фазов преход - твърдо тяло-течност.

Кинетичната енергия, която се предава на образуваната плазма. Тя е пропорционална на скоростта на потока, излизащ от дюзата на плазмотрона.

**Енергия за нагряване основата за напластяване.**

Загубната мощност зависи от множество процеси, съпътстващи плазمو-образуването и прахоподаването. Основните й съставки са:

- Енергия, отдавана при охлаждането на плазмата от стените на газоразрядната камера.

- Загряване на приелектродните области, където се захваща дъгата.

- Изпарение на разтопения прах за напластяване.

- Загуби в захранващия източник – изправител, трансформатор, дросел.

- Излъчване – излъчване от дъгата и плазмената струя под формата на светлина, топлина и електромагнитно лъчение.

КПД на плазмотрона може да бъде разглеждан като произведение от КПД на различните фази на трансформиране на енергията от захранващия източник до нанасянето на праховото покритие. Основно КПД се представя като:

$$\eta = \eta_E \cdot \eta_T, \quad (3.12)$$

където  $\eta_E$  е КПД на електрическия тракт до изхода на плазмотрона, а  $\eta_T$  е топлинния КПД на плазмотрона.

Реално загубите от трансформирането на енергията през тракта на трифазния изправител се изразява в загуби в трансформатора, изправителя и баластния резистор  $R_b$  или дросела  $L_1$ . Загубите в мощен трансформатор при по-висок процент на натоварване (70-90%), се оценяват на 3-5% (по данни на водещи производители). От същия порядък са и загубите в трифазния управляем изправител – до 2-5% (по данни на производители на полупроводникови елементи за силови преобразуватели). Следователно за целия тракт на изправителя, КПД може да надхвърли 90% и да достигне около 95%.

От друга страна топлинния КПД -  $\eta_T$  представляваща отношението между мощността на изходящата плазма и входната електрическа мощност, може да се изрази чрез:

$$\eta_T = \frac{q_{II}}{U \cdot I}, \quad (3.13)$$

където мощността на плазмата се изразява като:

$$q_{II} = c_p Q T. \quad (3.14)$$

В израза (3.14),  $c_p$  е специфичния топлинен капацитет на плазмообразуващия газ, а  $Q$  е неговия дебит. При определени условия за

конкретния експеримент, те са константни величини, но тъй като плазмообразуващият газ е двукомпонентен (състои се от аргон и азот), то  $c_p$  на газовата смес се променя и трябва да бъде пресметнат на база обемните съотношения на съставните му елементи. Тогава средният специфичен топлинен капацитет  $c_{pcp}$  ще се изрази чрез:

$$c_{pcp} = \sum_i^n c_{pi} \cdot r_i, \text{ при } r_i = \frac{V_i}{V} = \frac{Q_i}{Q}, \quad (3.15)$$

където:

$n$  - брой на компонентите в сместа,

$c_{pi}$  - собствен специфичен топлинен капацитет на всяка компонента,

$r_i$  - обемен дял на всеки газ,

$V_i/Q_i$  – обем/дебит на  $i$ -та газова компонента,

$V/Q$  – обем/дебит на цялата газова смес.

За определяне на мощността на плазмата тогава, ключова роля има нейната средномасова температура –  $T$ . Тя може да бъде измерена или изчислена посредством следния израз :

$$T = \frac{EI}{\pi d_k \alpha_k} \left[ 1 - e^{\left( -\frac{\pi d_k \alpha_k L_d}{c_p Q} \right)} \right], \quad (3.16)$$

Ако плазмата е съставена от няколко плазмообразуващи газове, тогава следва коефициентът на топлопреминаване да се изчисли като:

$$\alpha_{kcp} = \sum_{i=1}^n \alpha_{ki} \cdot r_i, \quad (3.17)$$

където  $r_i$  има същото значение както от формула 3.15,  $n$  е броят на газовете в сместа, а  $\alpha_{ki}$  е коефициентът на топлопреминаване на  $i$ -та съставка от плазмообразуващата смес.

Тогава, израза за мощността на плазмата придобива вида:

$$q_{\Pi} = T c_{pcp} Q = \frac{\bar{E} c_{pcp} Q}{\pi d_k \alpha_{kcp}} \left[ 1 - e^{\left( -\frac{\pi d_k \alpha_{kcp} L_d}{c_p Q} \right)} \right], \quad (3.18)$$

а топлинният КПД ще се изрази чрез:

$$\eta_{\Pi} = \frac{q_{\Pi}}{UI} = \frac{c_{pcp} QT}{UI} = \frac{\bar{E} c_{pcp} Q}{U \pi d_k \alpha_{kcp}} \left[ 1 - e^{\left( -\frac{\pi d_k \alpha_{kcp} L_d}{c_p Q} \right)} \right]. \quad (3.19)$$

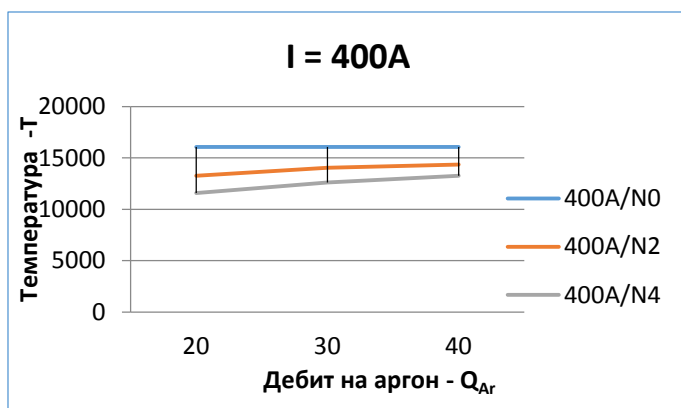
Следователно, достатъчно е да бъде намерена средномасовата температура на плазмата, за да може да се установи топлинния КПД на плазмотрона.

От уравнения (3.14) – (3.19) следва, че с увеличаване тока на дъгата, температурата и мощността на газа нарастват и КПД не се изменя. Увеличаването на дебита на газа довежда до намаляване на средномасовата температура и нарастване на мощността на плазмата и съответно на КПД.

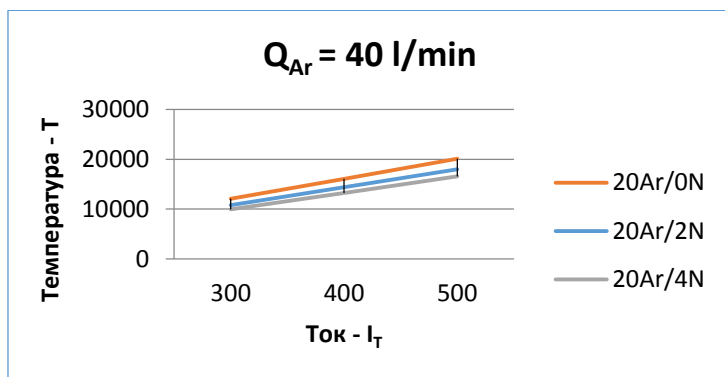
Топлинният КПД изразява степента на преобразуване на електрическата енергия в топлинна енергия на плазмената струя на изхода на плазмотрона.

Скоростта на изходящата плазма, също има значение при баланса на мощността на плазмотрона, тъй като една част от електрическата мощност на дъгата придава скоростта на образуваната плазма в изходящата точка на дюзата. Нейният дял от общия дял на топлинната мощност на плазмата като цяло е малък, но за точността на изследването трябва и е възможно да бъде оценен. С помощта на изходната скорост на плазмата или дебита на газа, мощността може да бъде изчислена чрез:

$$q_v = F \cdot v_{\Pi} = p \cdot Q = p \cdot S \cdot v_{\Pi} \quad (3.20)$$

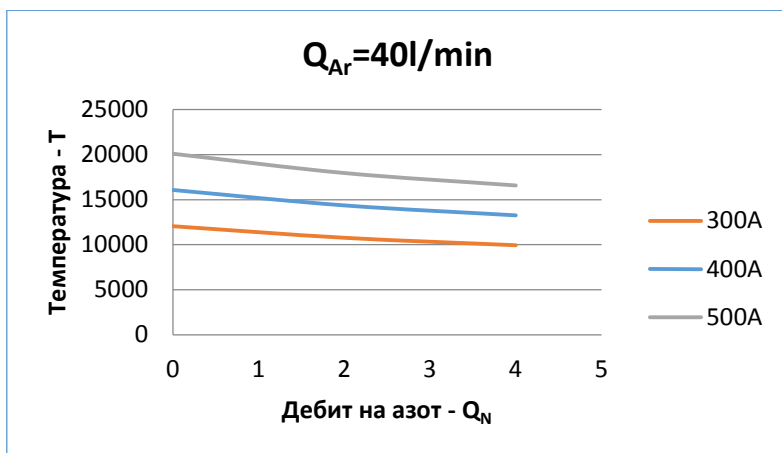


Фиг.3.5. Температурата на плазмената струя като функция на дебита на аргон.



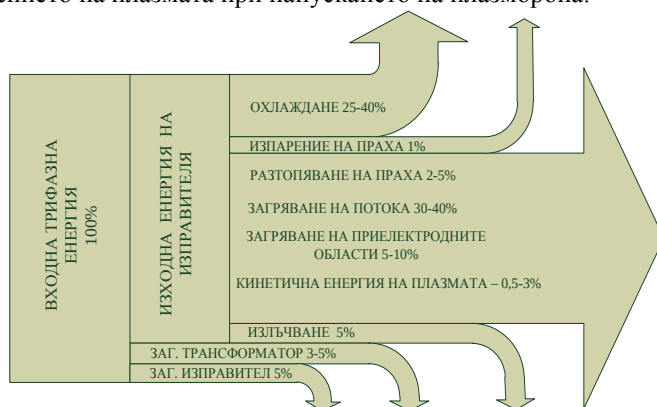
Фиг.3.6 Температурата на плазмената струя като функция на работния ток.

За пресмятането на общата топлинна мощност в температурен диапазон са необходими данни за специфичната топлина на основните плазмообразуващи газове: аргон и азот. На фигури 3.5-3.7 са показани изчисленията за температурата и топлинната мощност на плазмената струя.



Фиг.3.7 Температурата на плазмената струя като функция на дебита на азот.

Обща декомпозиция на входната електрическа мощност на процеса е представена на фигура 3.8. В мощността за загряването на газа се включва и тази за ускорението на плазмата при напускането на плазморона.



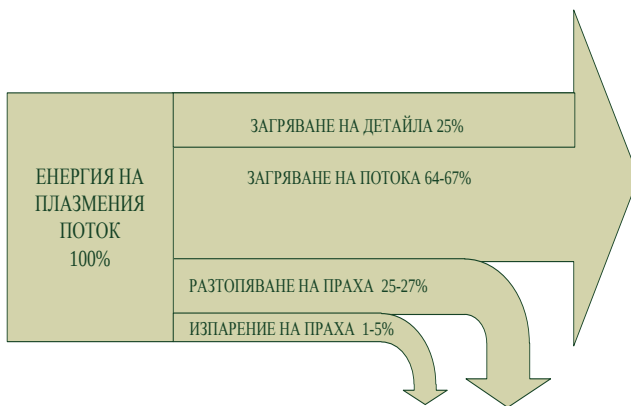
Фиг.3.8. Разпределение на входната енергия в процеса плазмено-порохово напаяване.

Фигура 3.8 представя загубите на входната енергия от точката на присъединяване към трифазното захранване до генерирането и напускането на плазмата и разтопения прах от дюзата на плазмотрона.

Цялостната оценка на ефективността на процеса може да се направи като се въведе коефициент на използване енергията на струята –  $\eta_{\text{пр}}$ . Той се дефинира като отношението между топлинната енергия за нагряване на праха -  $q_{\text{пр}}$ , от който се формира самото покритие и пълната енергия на плазмената струя –  $q_{\text{п}}$ , изходяща от дюзата на плазмотрона.

$$\eta_{\text{пр}} = \frac{q_{\text{пр}}}{q_{\text{п}}} \quad (3.21)$$

Разпределението на мощността на плазмената струя е представено на фигура 3.9.



Фиг.3.9. Разпределение мощността на плазмената струя

Голям процент от енергията на плазмата се отдава за нагряване на газа (65%-67%). Част от нея се изразходва за нагряването на детайла (25%). До около 25%-27% може да се отдели при загряването на праха и около 1-5% за неговото изпарение.

Ако трябва да се оцени общия КПД на целия процес –  $\eta_{\text{ппн}}$ , то той може да се изрази като отношение на енергията отделена при разтопяването на праха напластен върху детайла, към енергията консумирана в точката на включването към трифазния източник на напрежение. Тогава изразът за КПД би изглеждал така:

$$\eta_{\text{ппн}} = \eta_{\text{Е}} \eta_{\text{Т}} \eta_{\text{пр}} \quad (3.22)$$

Като се има предвид горните изрази и диаграмите с ориентировъчните проценти за разпределението на енергиите в целия процес, то числовото изражение на КПД на процеса -  $\eta_{\text{ппн}}$ , може да се окаже около (8-10)%.



Горните разсъждения могат да бъдат използвани, както за изчисление на КПД на процеса, така и за оценка и подобряване коефициента на използване на праха (КИП).

### Коефициент на стабилност на дъгата

Стабилността се характеризира с коефициент на устойчивост, числено равен на разликата от динамичните съпротивления на газовия разряд и източника – (1.2). Така той ще зависи не само от тяхната абсолютна стойност, но и от знака им. При спадаща характеристика на източника или електрическия разряд, динамичното им съпротивление е отрицателно.

Чрез предварително намерената ВАХ на изправителя, може да се пресметне диференциалното съпротивление на източника в изследвания токов диапазон. От предварителното снемане на ВАХ на УСИ се установява, че тя е относително плавно спадаща. Тъй като ВАХ е „твърда“ характеристика, то УСИ проявява характер на източник на напрежение т.е. динамичното му съпротивление е отрицателно и твърде малко като стойност:  $\frac{\partial U}{\partial I} \leq 0$ . От друга страна работната точка на разряда се намира в стръмен падащ участък на кривата на ВАХ, там където той вече е преминал от тлеещ в дъгов. Стръмността на ВАХ на разряда е по-голяма от тази на източника. Като цяло системата е стабилна и тя основно зависи от динамичното съпротивление на електродъговия разряд. Следователно, ако разгледаме динамичното съпротивление като отношение на крайните нарастъци на напрежението и тока в изходната верига, клонящи към нула и разполагаме със съответните данни за от ВАХ на източника, то можем да определим  $K_{CT}$  за всеки един режим на работа. Изхождайки от данните в таблица 3.4 е пресметнато динамичното съпротивление на източника и тези стойности са представени в таблица 3.13.

| Таблица 3.13. Динамично съпротивление на източника |                          |                          |                          |
|----------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $I_T, A$                                           | $R_d, m\Omega$           |                          |                          |
|                                                    | $Q_N, = 0 \text{ l/min}$ | $Q_N, = 2 \text{ l/min}$ | $Q_N, = 4 \text{ l/min}$ |
| 300                                                | -20                      | -20                      | -20                      |
| 350                                                | -10                      | -10                      | -10                      |
| 400                                                | 10                       | 0                        | -20                      |
| 450                                                | 20                       | 10                       | 0                        |
| 500                                                | 20                       | 10                       | 20                       |

Стойностите от таблица 3.13 показват, че в диапазона на 300-350A има слабо спадане на ВАХ и в този участък  $R_d < 0$ , докато при работни токове около 400A характеристиката е почти хоризонтална и  $R_d \approx 0$ . Положително

динамично съпротивление се установява едва при високи работни токове от порядъка на 450-500А. Този характер на изменение на ВАХ е идентичен при всякакви дебити на плазмообразуващите газове ( $Q_N = 0-4 \text{ l/min}$  и  $Q_{Ar} = 20-40 \text{ l/min}$ ). Като цяло стойностите на  $R_d$  са много малки и ВАХ е почти хоризонтална като проявява характер на източник на напрежение. В такъв случай стабилността на системата почти изцяло зависи от характера на изменение на електродъговия разряд и от стойността и знака на динамичното му съпротивление.

В известна степен добавянето на дросел на изхода на УСИ повишава  $K_{ст}$ , защото напрежението на самоиндукция  $U_L$  се противопоставя на промените на работния ток, но това намалява КПД поради пада на напрежение върху дросела и запасената енергия в него. Наличието на дросел ( $L_1$ ) и изглаждащ кондензатор ( $C_7$ ) между анода и катода формира нискочестотен LC филтър на изхода на изправителя, което предполага резонансна честота, при която стабилността на системата би се нарушила за флуктуации с честоти близки до нея. Запасената енергия в бобината и рязката промяна на тока при изменението на проводимостта в плазмения канал на електрическата дъга, могат да доведат до скокообразно нарастване на пада на напрежението върху дросела  $L_1$ :  $U_{L1} = -\frac{dI_T}{dt}$  (Приложение I). Тогава напрежението върху електродъговия разряд ще се изрази като:

$$U_H = U_{пх} - U_L = U_{пх} - L \frac{dI_T}{dt} \quad (3.23)$$

Като цяло коефициентът на устойчивост може да бъде оценен след получаване характерът на изменение на тока и напрежението на електродъговия разряд.

### Обработка на измерените чрез NI-DAQ сигнали

Извършени са серия експерименти, целящи определянето на изходните величини в реално време при динамичен режим на работа на системата. Предвид стохастичните флуктуации на заряда в плазмения канал и промяната на неговата проводимост и геометрични размери, стойностите на измерваните величини имат случаен характер. Това налага тяхната статистическа обработка и съответно провеждането на многократни измервания. По време на процеса, DAQ системата извършва серия записи, всеки от които за изследвания режим се състои от осемкратно записване на времедиаграма с продължителност 1сек. на работния ток  $I_T$  и напрежението  $U_{AK}$  между електродите на плазмотрона.

### Проверка за стационарност

За достоверност на получените резултати е необходима проверка за стационарност и ергодичност на измерените случайни сигнали, както за

напрежението, така и за тока. Проверката за стационарност се извършва по метода на сериите. Реализацията се разделя на равни 8-времени интервала. За всеки интервал се изчисляват математическото очакване и дисперсията по формули (2.37) и (2.42). Определя се общата средна стойност -  $\bar{\mu}_x = \bar{U}_{AKcp}$  и  $\bar{\sigma}_{U_{AK}}^2$  и се сравнява с получените за всеки интервал. Ако  $\bar{U}_{AKcp} > U_{AKi}$  се отразява знак (+), ако  $\bar{U}_{AKcp} < U_{AKi}$  се отразява знак (-). Подреждат се знаците по реда на излизането им и последователността от еднакви знаци образуват серия – r. Процеса е стационарен, ако  $r > r_{кр}$ .

Направена е проверка чрез получените реализации на основните режими за тока  $I_T$ : 300A, 400A и 500A и при дебит на азот  $Q_N$ : 0, 2 и 4 l/min.

За дискретизация при  $n = 9$ , критерия за стационарност  $r(v; \alpha/2) = 2,26$  при ниво на значимост  $\alpha = 0,05$ .

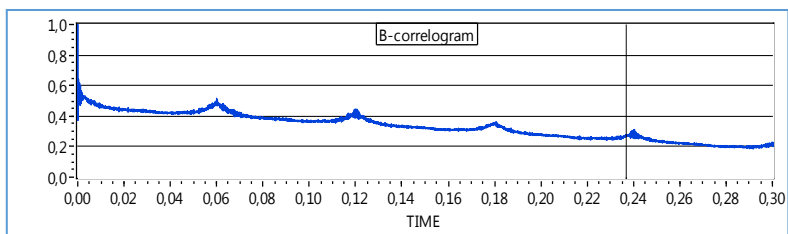
Всички изследвани реализации удовлетворяват критерия за стационарност. При всички девет реализации се получават малки отклонения на стойността на измерваната величина от усреднената стойност за всички реализации.

#### Проверка за ергодичност

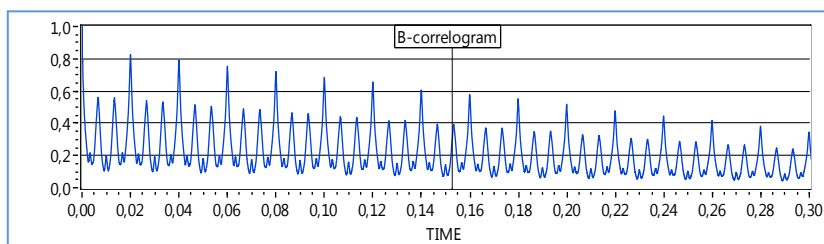
Проверката за ергодичност на случайните величини може да се осъществи като се изследва АКФ на сигнала. Изпълнението на условие (2.36) означава, че сигналът е ергодичен. След направените изчисления за  $U_{AK}$  и  $I_T$ , и построяване на АКФ на тези сигнали се оказва, че тя клони към нула при всички режими, което означава, че те са ергодични.

Характерът на АКФ при почти всички изследвани сигнали проявява силна или по-слаба периодичност, която може да бъде разкрита чрез прилагането на теоремата на Винер-Хичин т.е. уравнение (2.33), даващо връзката на АКФ с честотния спектър на сигнала. АКФ е показател за характера на изследваните случайни сигнали, защото е пряко свързана с честотния им спектър. Имайки предвид преобразуването на Фурие, периодичност в АКФ говори за наличие на съставки в случайните сигнали с точно определени честоти, които дават информация за процесите, протичащи в камерата на плазмотрона.

Така например режими, при които липсват нискочестотни пулсации на мощността в камерата на плазмотрона, се характеризират с по-плавни и слабо изразени пикове в АКФ. При тях също така се наблюдава слабо изразена периодичност, но с висока честота (фиг.3.10). При режими с големи пулсации на изходните величини, в АКФ се наблюдават стръмни пикове с голяма амплитуда и силно изразена нискочестотна периодичност.



Фиг.3.10. Режим с малки пулсации на изходните величини



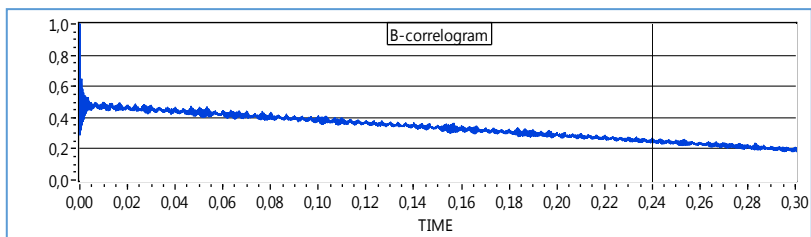
Фиг.3.11. Режим с големи пулсации на изходните величини

### Интервал на автокорелация

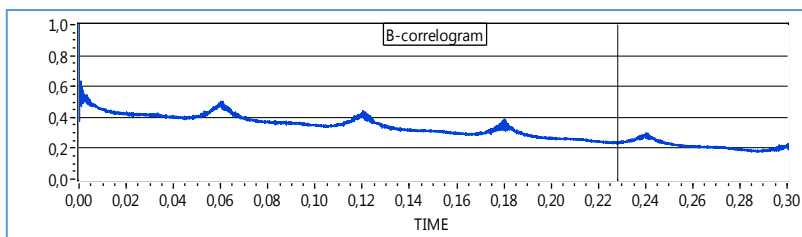
Важен параметър при изследването на случайни сигнали представлява интервалът на корелация –  $\tau_x$ . Параметърът  $\tau_x$  определя скоростта на спадане на корелограмата и дефинира интервал, в който може да се твърди, че има статистическа връзка и съответно предсказуемост между отделните отчети на една реализация. Изчисляването на  $\tau_x$  става чрез израза:

$$\tau_x = \int_0^{\infty} |\rho_x| d\tau, \quad \rho_x = \frac{R_x(\tau)}{R_x(0)} \quad (3.25)$$

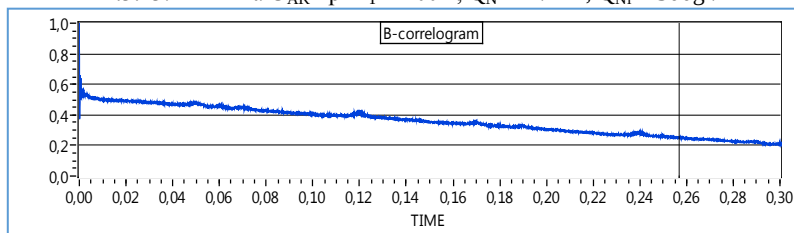
В израза (3.21)  $\rho_x$  е нормираната автокорелационна характеристика.



Фиг.3.12. АКФ на  $U_{AK}$  при  $I_T = 300A$ ,  $Q_N = 2l/min$ ,  $Q_{Ni} = 500gr/h$



Фиг.3.13. АКФ на  $U_{AK}$  при  $I_T = 400A$ ,  $Q_N = 2l/min$ ,  $Q_{Ni} = 500gr/h$



Фиг.3.14. АКФ на  $U_{AK}$  при  $I_T = 500A$ ,  $Q_N = 2l/min$ ,  $Q_{Ni} = 500gr/h$

На фиг.3.12 - 3.14 са представени графиките на АКФ при режими на работа на АПН-50 с основни нива на значимите фактори:  $x_2$ ,  $x_4$ . Курсорът маркира интервалът на автокорелация  $\tau_x$  на случайния сигнал. За АКФ на фиг. 3.12  $\tau_x = 0,24сек$ , за АКФ на фиг.3.13  $\tau_x = 0,228сек$ . за АКФ на фиг.3.14  $\tau_x = 0,24сек$ . Честотата на дискретизация на DAQ модула е избрана  $f_s = 100 kHz$ , което според теоремата на Котелников определя и горната гранична честота ( $f_h$ ), която може да бъде измерена в спектъра на изследвания сигнал, както и разделителната способност ( $r$ ) при определяне на корелограмата:

$$f_h \geq \frac{1}{2}f_s \quad (3.26)$$

$$r \leq \frac{1}{2f_h}. \quad (3.27)$$

За нуждите на изследването от значение е измерването на нивото на хармониците до №100 на основната честота (50Hz), т.е. до 5000Hz. Избраната честота на дискретизация на DAQ модула ( $f_s = 100kHz$ ), значително надхвърля необходимата за получаването на 100-я хармоник ( $f_s = 10kHz$ ). Това гарантира точност и достоверност на измерванията в широк честотен диапазон.

### Влияние на несиметрията и филтрация на постоянната съставка.

При измерването на трифазната мощност се използват измервателните преобразуватели описани в глава II. Въпреки подбора на елементи с еднакви параметри и възможността за регулиране на коефициентите им на преобразуване, абсолютното симетриране на диференциалните входове е

невъзможно, поради случайния характер на производствените толеранси за всеки отделен елемент. Това се извява като генериране на постоянна съставка в изходния сигнал при снемането на осцилограмите на тока и напрежението. Ясно е, че в реалните измервани величини тази съставка липсва и че тя се появява в измервателния тракт поради наличието на несиметрия в диференциалните входове спрямо общата точка с нулев потенциал на измервателната схема. При пресмятането параметрите на измерения сигнал, постоянната съставка добавена към сигнала, би повишила нейната ефективна стойност. Измерения сигнал за напрежението на изхода на АС/АС преобразувателя (за променливо напрежение), може да се изрази чрез израза:

$$u(t) = U_0 + U_m \cos(\omega t + \varphi_u), \quad (3.28)$$

където  $U_0$  е допълнително появилата се постоянна съставка поради несиметрия, а втория член на израза представлява реалния променлив сигнал, който трябва да бъде измерен. Подобен израз се получава и при измерването на тока  $I_T$  с използването на диференциалния вход на DAQ системата чрез измервателен външен шунт.

Тъй като ефективната стойност на една променлива величина се изразява чрез:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |u(t)|^2 dt}, \quad (3.29)$$

то абсолютната грешка ( $\Delta U$ ) от несиметрия на входовете би била равна на разликата:

$$\Delta U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |U_m \sin(\omega t)|^2 dt} - \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |U_0 + U_m \sin(\omega t)|^2 dt}. \quad (3.30)$$

След решението на интеграла за абсолютната грешка се получава:

$$\Delta U = \frac{U_m - \sqrt{U_m^2 + 2U_0^2}}{\sqrt{2}} \quad (3.31)$$

За отстраняване на тази грешка при измерването, освен прецизното регулиране чрез гравидните елементи на делителите е възможно софтуерно да се обработи получения сигнал така, че да се филтрира появилата се постоянна съставка при измерването и по този начин да се премахне влиянието на входната несиметрия. В предложената програма за изчисление ефективната стойност на входните ток и напрежение на база записаните времедиаграми, преди определяне на ефективната стойност на величините, постоянните им съставки се филтрират.

## ИЗВОДИ

Оценени са основните фактори, влияещи на процеса плазмено напастяване. Разработени са математически модели за определяне тежестта

на влияние на всеки от значимите фактори. С най-висока степен на влияние от всички фактори се оказват:  $x_1$  – работен ток и  $x_3$  – дебит на азот. В по-слаба степен е влиянието на фактори  $x_2$  – дебит на аргон и  $x_4$  – дебит на прах.

Проверени и доказани са адекватността на моделите чрез критерия на Фишер. При таблична стойност на критерия  $F_1=3,4$ , за модела на КПД е получена стойност  $F=1,7$ , а за модела на коефициента стабилност  $F=2,27$ .

Снета е ВАХ на системата захранващ източник - плазмотрон и влиянието на режимните параметри  $x_2$  – дебит на аргон и  $x_3$  – дебит на азот.

Изчислени са топлинната мощност на струята за основните режими. При отделните режими тя варира от 2188 W до 7418 W.

Изчислена е и кинетичната мощност на струята. Делът ѝ от общата мощност варира от 0,55% до 3,33%.

Изчислен е топлинният КПД на плазмотрона и е направена декомпозиция на енергията вложена при процеса.

Изчислено е динамичното съпротивление на захранващия източник. Тъй като стойностите му клонят към нула оказва се, че то слабо влияе върху коефициента на стабилност на системата.

Извършена е проверка за стационарност и ергодичност на получените случайни сигнали от измерваните величини. Проверката показва, че сигналите, чрез които се изследват режимите са стационарни и ергодични. Това дава възможност за точна обработка и интерпретация на измерените величини.

За основните режими е изчислен и интервалът на корелация, чиято стойност показва достоверност на измерените реализации.

## ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ ВЪРХУ ИЗХОДНИТЕ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕЛИЧИНИ

### *Установяване влиянието на технологичните параметри върху изходната мощност*

За оптимизация на режимите при плазмено праховото напастяване, ключов параметър се явяват нивата на изменение на технологичните параметри, както и измерването на изходните и входните електрически величини. В таблица 4.1 са представени параметрите на основните режими (P1) – (P27), при които са заснети изходните електрически величини на АПН-50, като са показани нивата на изменение на факторите  $x_1$ ,  $x_2$ , и  $x_3$ . При оценка влиянието на фактор  $x_4$  (дебит на прах за напастяване), групата експерименти от таблица 4.1 се повтаря за трите избрани нива на дебита на прах  $Q_{Ni}$ : 0, 400, 800 gr/h. За нива  $Q_{Ni}$ : 400 и 800 gr/h, фактор  $x_5$  (дебит на транспортен газ – аргон) има константно ниво  $Q_{Ar}=1,5l/min$ . Представените данни за ефективната стойност на напрежението  $U_{AK}$  и изходната мощност  $P_{изх}$  са изчислени след

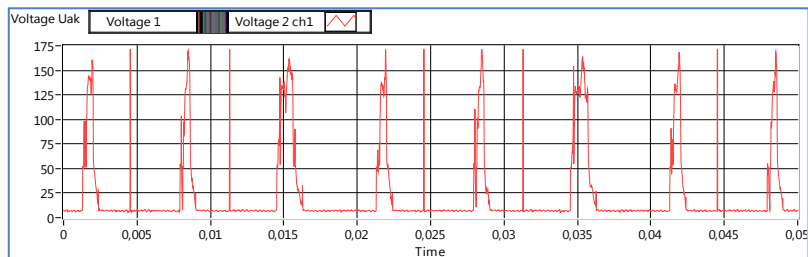
усредняването им от снетите реализации ( $n = 9$ ) на случайните сигнали, отговарящи на тези величини.

| Таблица 4.1 Режими на АПН-50 при изменение на фактори: $x_1$ , $x_2$ и $x_3$ |                             |                             |                             |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                                                              | $Q_{Ar} = 20 \text{ l/min}$ | $Q_{Ar} = 30 \text{ l/min}$ | $Q_{Ar} = 40 \text{ l/min}$ |
| I                                                                            | $Q_N$                       | $Q_N$                       | $Q_N$                       |
| [A]                                                                          | [l/min]                     | [l/min]                     | [l/min]                     |
| 300                                                                          | 0 (P1)                      | 0 (P10)                     | 0 (P19)                     |
|                                                                              | 2 (P2)                      | 2 (P11)                     | 2 (P20)                     |
|                                                                              | 4 (P3)                      | 4 (P12)                     | 4 (P21)                     |
| 400                                                                          | 0 (P4)                      | 0 (P13)                     | 0 (P22)                     |
|                                                                              | 2 (P5)                      | 2 (P14)                     | 2 (P23)                     |
|                                                                              | 4 (P6)                      | 4 (P15)                     | 4 (P24)                     |
| 500                                                                          | 0 (P7)                      | 0 (P16)                     | 0 (P25)                     |
|                                                                              | 2 (P8)                      | 2 (P17)                     | 2 (P26)                     |
|                                                                              | 4 (P9)                      | 4 (P18)                     | 4 (P27)                     |

За определяне влиянието на работния ток върху характера на изменение на напрежението и мощността на дъгата чрез измервателните уреди на изправителя се настройва тока по неговата ефективна стойност, а чрез DAQ модула се сменя формата на изходните величини ( $I_T$ ,  $U_{AK}$ ). Направен е сравнителен анализ на получените резултати за оценка влиянието на тока  $I_T$  ( $x_1$ ) върху формата на времедиаграмите на напрежението  $U_{AK}$  и съответно върху изходната електрическа мощност, консумирана от плазмотрона –  $P_{изх}$ . Изходната мощност е право пропорционална на снетите моментни стойности на величините  $I_T$  и  $U_{AK}$  ( $p(t) = u(t) \cdot i(t)$ ). От друга страна моментната стойност на изходното напрежение  $U_{AK}$ , определя дължината на електрическата дъга в камерата на плазмотрона -  $L_D$ , която пряко определя изходната топлинна мощност на плазмената струя, топлинния КПД на плазмотрона, както и стабилността на процеса. За установяване влиянието на работния ток са

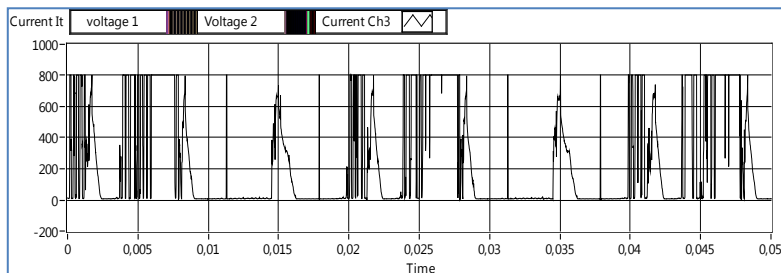


изследвани режими: P1, P4, P7. На фиг.4.1 - 4.2 са представени графиките на изходното напрежение и ток при режим на работа P4 и дебит на прах –  $Q_{Ni} = 0$  gr/h.



Фиг.4.1. Осцилограма на напрежението  $U_{AK}$  при  $I_T = 400A$ .

Структурно времедиаграмите на тока и напрежението си приличат: състоят се от стръмни и кратки импулси с продължителност от около 1 - 2,5ms, с период на повторение от 6,6ms, съответстващ на честотата на пулсациите на изправителя - 300Hz. Това определя и съответните пулсации в отделената мощност на електрическата дъга, както и колебания в топлинното поле на плазмената струя, което би могло да доведе до нехомогенност на покритието.



Фиг.4.2. Осцилограма на тока  $I_T$  при  $I_T = 400A$ .

Тези колебания са в синхрон с честотата и големината на коефициента на пулсации  $K_{\Pi}$  в изхода на УСИ. Именно пулсациите в изходното напрежение на изправителя са основната причина за структурата на  $U_{AK}$ . Доказателство за това е тяхното местоположение, което съвпада с моментите на отпушване на силовите изправителни елементи (тиристорите). Следователно, малък коефициент на пулсации  $K_{\Pi}$  ще способства за равномерно и плавно трансформиране на енергията през камерата на плазмотрона, което би довело до равномерност при разтапянето на праха за напласяване и съответно за формирането на по-хомогенно покритие.

Включването на изглаждащ дросел ( $L_1$ ) и обратен диод  $V_{D7}$  в изходната верига на изправителя е причина за получаването на по-добра равномерност в графиката на мощността и за известна разлика между графиките на напрежението и тока. Това се обуславя от запасената енергия в дросела и освобождаването ѝ като енергия на дъгата при установяване на отрицателна полярност на напрежението върху диода. В този момент при разглежданите режими, в графиките на тока се установяват стръмни пакети от близко разположени импулси. Периодът на целия пакет е от порядъка на 2-6 ms като продължителността на съставните импулси в пакета е от 0,05 до 0,8 ms. Отстоянието на отделните пакети един от друг е от порядъка на 20 ms. Параметрите на тези групи импулси зависят от начина на протичане на енергията запасена в дросела  $L_1$ , а кратко периодичните импулси в пакетите се определят от флукуациите в плазмения канал и бързите премествания на приелектродните области на дъгата. В момента на протичане на енергията от дросела през плазмения канал, между моментните стойности на тока и напрежението има значително несъответствие. Вследствие влиянието на дросела, обратния диод и наличието на гореспоменатите пакети импулси, графиката на тока изглежда по-равномерна от тази на напрежението. Това определя и по-равномерно топлинно поле на плазмената струя и на отделената топлинна мощност на дъгата във времето. След изчерпването на енергията на дросела, електрическата дъга в изходната верига се проявява като активен товар и тогава напрежението и токът са с еднаква форма и пропорционални според степента на проводимост на плазмения канал. Целия този процес се повтаря с период от 20 ms, което е и периодът на мрежовата честота.

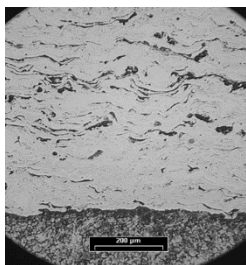
Установява се, че с увеличаване ефективната стойност на тока, структурата на осцилограмите си остава същата, като слабо нарастват амплитудите на измерваните ток и напрежение. Формата на пулсациите и честотата (300Hz) на тяхната повтораемост се запазват същите.

| Таблица 4.2 Относително увеличение на $U_{AK}$ ( $\delta U_{AK}$ ) и $P_{изх}$ ( $\delta P_{изх}$ ) при изменение на $I_T$ |                  |             |                     |              |                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------|----------------------|
| $I_T, A$                                                                                                                   | $\delta I_T, \%$ | $U_{AK}, V$ | $\delta U_{AK}, \%$ | $P_{изх}, W$ | $\delta P_{изх}, \%$ |
| 300                                                                                                                        | -                | 39,40       | -                   | 11,88        | -                    |
| 400                                                                                                                        | 33,33            | 45,09       | 14,44               | 18,03        | 51,77                |
| 500                                                                                                                        | 66,67            | 47,07       | 19,47               | 22,13        | 86,28                |

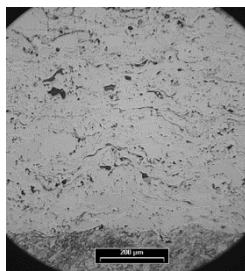
Изменението на електрическата мощност  $P_{изх}$  и напрежение  $U_{AK}$  при регулирането на работния ток е представено в таблица 4.2. Вижда се, че увеличаването на работния ток оказва влияние върху изходната мощност.

Ефекта се увеличава и от нарастването на ефективната стойност на напрежението –  $U_{AK}$ , поради особеностите на ВАХ на източника – плавно нарастващата зависимост  $U_{AK} = f(I_T)$  в участъка след  $I_T = 400A$ .

Структурата на полученото покритие при два от режимите (P2, P8) е представена на фиг.4.3 - 4.4. С увеличаване на работния ток нараства мощността на плазмената струя, което води до по равномерно разтопяване на праха и намаляване порестостта на покритието. Това довежда до увеличаване на неговата твърдост. От фиг.4.3 и 4.4 се вижда, че покритието е с по-голяма плътност при P8, когато плазмената струя е с увеличена мощност, отколкото при P2.

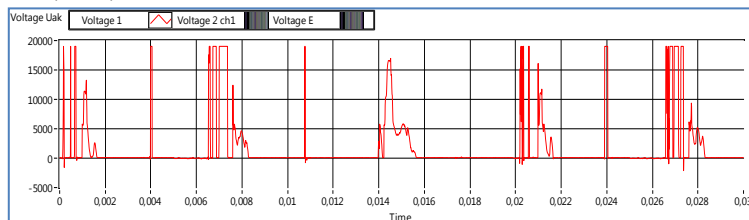


Фиг.4.3. Структура на покритието при режим P2 ( $I_T = 300A$ ).



Фиг.4.4. Структура на покритието при режим P8 ( $I_T = 500A$ ).

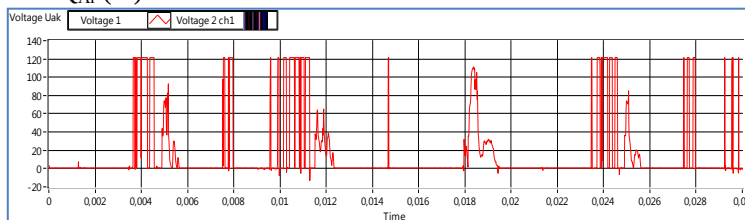
Важен фактор за енергийните характеристики на електрическата дъга е дебита и вида на плазмообразуващия газ. При константна стойност на работния ток, фиксирана на основно ниво  $I_T = 400A$ , се изменя стойността на дебита на аргон ( $Q_{Ar}$ ) в граници от 20 до 40 l/min. На фигури 4.5 - 4.6 са представени получените резултати за изходните параметри при следните режими: P4, P13, P22.



Фиг.4.5. Осцилограма на напрежението  $U_{AK}$  при  $Q_{Ar} = 20$  l/min.

Наблюдава се малка промяна във формата на напрежението. Увеличава се фрагментацията на изходните импулси и тяхната обща продължителност.

Структурата и периодичността на формираните пакети остава непроменена. Таблица 4.3 показва относителното увеличение на  $U_{AK} - \delta U_{AK} (\%)$  и на  $P_{изх} - \delta P_{изх} (\%)$  в зависимост от дебита на аргон –  $Q_{Ar}$  и неговата относителна промяна –  $\delta Q_{Ar} (\%)$ .



Фиг.4.6. Осцилограма на напрежението  $U_{AK}$  при:  $Q_{Ar} = 40 \text{ l/min}$ .

Изследванията показват слабо влияние на дебита на аргон върху изходното напрежение при фиксирана стойност на тока. От графиките на фиг. 4.5 - 4.6 се вижда еднотипната структура на напрежението, състоящо се от пакети краткотрайни импулси, които увеличавайки своята продължителност увеличават и ефективната стойност на напрежението както и електрическата мощност.

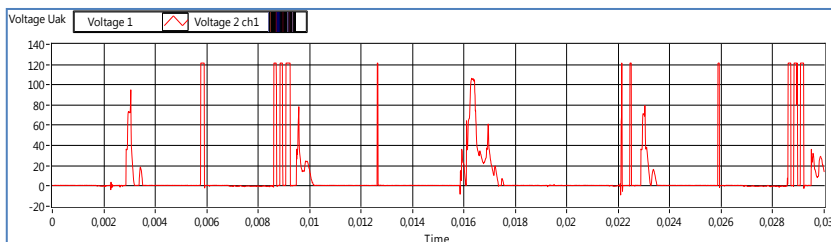
За увеличаване влиянието на изходната мощност на дъгата се добавя и втори (допълнителен) плазмообразуващ газ - азот, чиято по-висока специфична енталпия от тази на аргона, увеличава количеството енергия на единица обем в общата плазмообразуваща смес. Експериментът е извършен при фиксирано средно ниво на тока ( $I_T = 400A$ ) и дебит на аргона -  $Q_{Ar} = 30 \text{ l/min}$ , като са изпълнени режими P13, P14, P15. Резултатите са отразени на фигури 4.9 и 4.10, които показват влиянието на азота в плазмообразуващата смес върху изходното напрежение –  $U_{AK}$ . Добавка на азот с дебит  $2 \text{ l/min}$  към аргона, което представлява едва 10% от общото количество газ, чувствително повишава ефективната стойност на  $U_{AK}$ , както и нивото на изходната мощност.

Осцилограмите показват подобна структура по отношение на формата и периодичността на формираните импулси. Разликата при добавяне и увеличаване на дебита на азот е тази, че върху силно изразените импулси на напрежението се откроява високочестотна съставка с по-голяма амплитуда от тази при липса на азот в сместа. Като резултат се получава по-голяма дълбочина на модулацията на тези импулси, което означава по-високо ниво на кратковременните флуктуации, генерирани в плазмения канал на дъгата. Пакетите импулси в осцилограмата на тока са с ниска и почти константна продължителност от порядъка на  $0,1 - 0,2 \text{ ms}$ , което е показател за по-високата

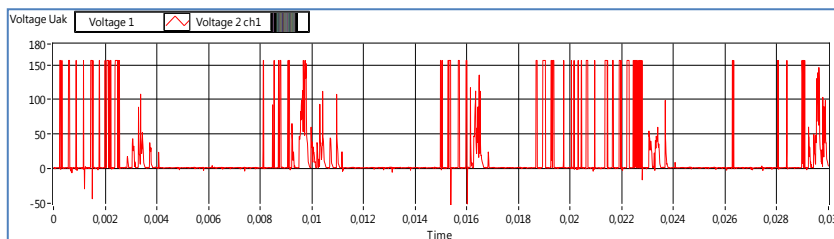
честота на флуктуациите и за бързото преместване на дъгата по площта на катода.

Установяват се две тенденции във времетраенето на импулсите:

Първата свидетелства за увеличена изходна мощност и по-голяма хомогенност на разтопените прахови частици (независимо от тяхната големина в интервала 25-45mm) и съответно получаване на по-добра равномерност на характеристиките на покритието.



Фиг.4.9. Осцилограма на напрежението  $U_{AK}$  при  $Q_N = 0$  l/min.



Фиг.4.10. Осцилограма на напрежението  $U_{AK}$  при  $Q_N = 4$  l/min.

Втората показва ефект на увеличаване на честотата на пулсациите. Теоретично този ефект би трябвало да действа в посока обратна на първия, като нарушава хомогенността на разтопения материал (тук също е необходимо да се вземе под влияние скоростта на потока, времето на пребиваване на праха в плазмената струя, както и топлинния капацитет и температурата на топене на праха). Това обаче поради инертността на топлопренасянето като процес, оказва значително по-слабо влияние и не би трябвало да наруши равномерността на покритието.

Увеличаването на дебита на плазмообразуващия газ с добавка на азот от 10%, дава увеличаване на електрическата мощност с 16,42%, а 20% увеличение добавя към нивото на електрическата мощност почти около 1/3 от стойността ѝ в сравнение с това при липса на азот. Относителната промяна на напрежението е от същия порядък както и за мощността.

В таблица 4.4 са представени процентните увеличения на  $U_{AK} - \delta U_{AK}$  (%) и на  $P_{изх} - \delta P_{изх}$  (%) в зависимост от нивата на дебита на азот –  $Q_N$  и относителната промяна в дебита на плазмообразуващия газ –  $\delta Q_N$  (%).

| Таблица 4.4 Относително увеличение на $U_{AK}$ ( $\delta U_{AK}$ ) и $P_{изх}$ ( $\delta P_{изх}$ ) при изменение на $Q_N$ |                  |              |                     |               |                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------|---------------------|---------------|----------------------|
| $Q_N$ , l/min                                                                                                              | $\delta Q_N$ , % | $U_{AK}$ , V | $\delta U_{AK}$ , % | $P_{изх}$ , W | $\delta P_{изх}$ , % |
| 0                                                                                                                          | -                | 45,64        | -                   | 18,33         | -                    |
| 2                                                                                                                          | -                | 52,77        | 15,62               | 21,34         | 16,42                |
| 4                                                                                                                          | 100              | 60,39        | 32,32               | 24,30         | 32,57                |

Извършените експерименти показват, че с добавянето на малки количества азот в плазмообразуващата смес, се увеличава значително нивото на електрическата мощност на плазмотрона, което променя характера на изменение на напрежението  $U_{AK}$  (фиг.4.9 - 4.10). Технологично това довежда до по-добро разтопяване на праховите частици и повишаване качествата на формираното покритие. Добавката на азот освен че увеличава топлинната мощност на плазмата, но води и до повишение на кинетичната ѝ енергия, което се изразява в нарастване скоростта на плазмената струя. От друга страна това внася по-голяма турбулентност в зона близка до дюзата и по-висока стойност на дисперсия на праховите частици от основната посока на движение. В резултат напластяването в тази близка зона дава по-добра равномерност на покритието на обработвания детайл.

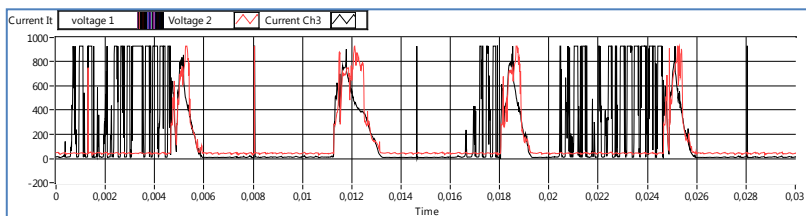
Важен фактор при оценката на работата на плазмено-праховата апаратура е дебитът на праха за напластяване ( $x_4$ ). Той също влияе върху параметрите на плазмената струя и респективно върху качествата на покритието. Въвеждането на праха за напластяване в плазмената струя става чрез транспортен газ (аргон), чието влияние както беше разгледано по-горе е незначително, защото като фактор в ПФЕ ( $x_5$ ), неговият дебит –  $Q_{ArT}$  представлява малък процент от общото количество на плазмообразуващия газ. Експериментът за установяване на влиянието на праха е проведен при режим P5 от табл.4.1, като дебитът му се променя в граници  $Q_{Ni} = 0-800$  gr/h, а дебитът на транспортния газ -  $Q_{ArT}$  е фиксиран на 1,5 l/min.

Графиките на получените напрежения и ток са представени на фиг.4.13 и 4.14. Стойностите за напрежението и мощността са представени в таблица 4.5. Като цяло влиянието на дебита на прах е слабо. Наблюдава се лек спад в нивото на електрическата мощност (1,88% - 3.2%), както и на нивото на напрежението  $U_{AK}$  (1,85% - 4,56%). По-чувствителна промяна се наблюдава във формата на времедиаграмите на тока и напрежението. Там има значително

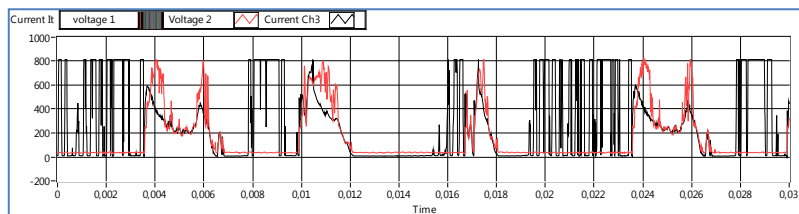
разширение на импулсите като тяхната продължителност достига до 4ms.– повече от два пъти по-голяма в сравнение с продължителността им при липсата на прах за напастяване (1 - 2ms).

| Таблица 4.5 Влияние на праха за напастяване върху $U_{AK}$ ( $\delta U_{AK}$ ) и $P_{изх}$ ( $\delta P_{изх}$ ) |              |                     |               |                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------------|---------------|----------------------|
| $Q_{Ni}$ , l/min                                                                                                | $U_{AK}$ , V | $\delta U_{AK}$ , % | $P_{изх}$ , W | $\delta P_{изх}$ , % |
| 0                                                                                                               | 53,03        | -                   | 21,28         | -                    |
| 400                                                                                                             | 52,05        | -1,85%              | 20,88         | -1,88%               |
| 800                                                                                                             | 50,61        | -4,56%              | 20,60         | -3,20%               |

Този ефект намира своето обяснение като се има предвид установеното векторно поле на скоростите в дюзата. Перпендикулярното въвеждане на транспортния газ в дюзата деформира изходната струя. Това довежда до изменение на пътя и дължината на дъгата, която е пряко свързана с изследваното напрежение. Вероятно по-голямата продължителност във времедиagramата на импулсите на напрежението се дължи на описания ефект.



Фиг.4.13. Осцилограми на напрежението и тока при  $Q_{Ni} = 0$  gr/h.

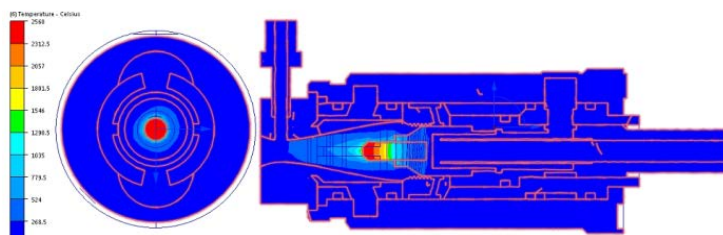


Фиг.4.14. Осцилограми на напрежението и тока при  $Q_{Ni} = 800$  gr/h.

Също така при увеличено прахоподаване се наблюдава задълбочаване на кратковременните флукутации в изходното напрежение. Този ефект се проявява поради увеличението на количеството на праха в дюзата, което въздейства на плазмената струя и отнема от нейната енергия (фиг.4.16), като я

охлажда. Това от своя страна преразпределя температурното поле в дюзата и също въздейства на формата и дължината на електрическата дъга.

Тя се изменя според променения температурен градиент и това намира отражение в изменението на времедиagramата на изследваното напрежение - появяват се кратковременни флуктуации поради възникването на локални охладени области в дюзата. Тяхната амплитуда зависи от гранулометричния състав на праха - едрите частици отнемат повече от енергията на плазмената струя и генерират по-големи спадове във формата на напрежението  $U_{AK}$ .



Фиг. 4.16. Температурно поле в камерата на плазмотрона.

#### Измерване на входните величини

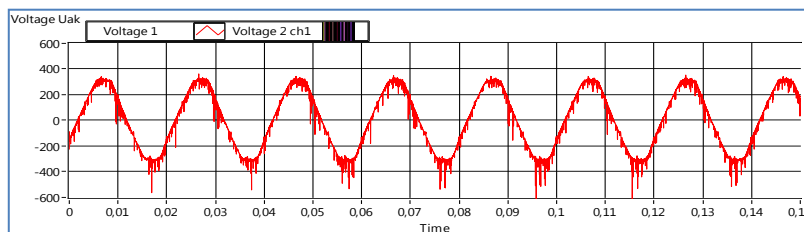
При определяне ефективността на плазмотрона, от особена важност е измерването на параметрите на входните величини. Отношението на изходната мощност към електрическата мощност на входа на изправителя определя КПД на електрическия тракт на апаратурата за плазмено напастяване. Изчислението на входната мощност е коренно различно от това на изходната поради факта, че тя представлява мощността на трифазната захранваща мрежа. Необходимо е пресмятането на консумираната от АПН-50 трифазна мощност.

След предварителни измервания бе установено, че захранващата трифазна верига е симетрична по ток и по напрежение. Това опростява задачата и тогава е необходимо измерването на напрежението и тока в една от фазите. Експеримента е проведен при същите режимни параметри, при които се извърши измерването на изходната мощност. По този начин се гарантира достоверност на получените резултати при определяне ефективността на плазмотрона и стабилността на дъгата му.

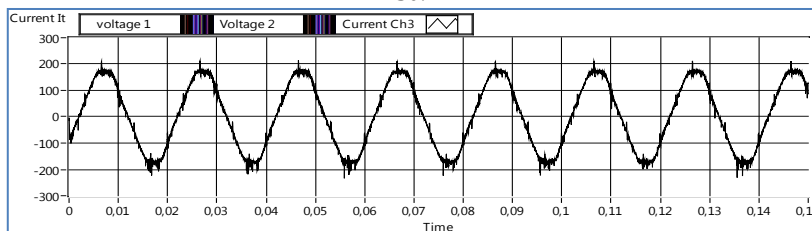
На фиг.4.17 и 4.18 са дадени времедиagramите за тока и напрежението, които при всички режими на работа имат еднаква структура. В предишния раздел бе установено, че най-силно влияние върху изходната мощност оказват дебитът на азот ( $x_3$ ) и работния ток ( $x_1$ ). Затова за установяване на входната мощност са направени експерименти, при които се изменят основно тези два



параметъра. Разликата при различните режими е само в нивото на входния ток, който слабо се увеличава с нарастване на изходния ток  $I_T$  на изправителя. Наблюдава се и слаба промяна при изменение на дебита на азот. Първият от експериментите бе извършен при фиксирани  $x_1$  ( $I_T = 300A$ ),  $x_2$  ( $Q_{Ar} = 20$  l/min) и  $x_4$  ( $Q_{Ni} = 0$  gr/h). Нивото на фактор  $x_3$  варира в интервала  $Q_N = 0-4$  l/min. По този начин се реализират режими: P1, P2 и P3.



Фиг.4.17. Форма на входното напрежение при различните режими на работа на АПН-50.



Фиг.4.18. Форма на входния ток при различните режими на работа на АПН-50.

Останалите две серии експерименти са извършени при същите условия за параметри  $x_2$ - $x_4$  чрез установяване на параметър  $x_1$  – работния ток  $I_T$  на нива 400A и 500A.

### Честотни характеристики на измерените сигнали.

Една от най-важните характеристики на всеки периодичен или случаен сигнал, това е честотния му спектър. Той в голяма степен характеризира, както самата величина, така и процесът, който тя изразява. Така например изходното напрежение, изразено в честотната област дава информация за динамиката на процеса в газоразрядната камера на плазмотрона. Тъй като плазмотронът е със самоустановяваща се дъга, а стабилизацията на дъгата е вихрова, то процесът на самоустановяване и стабилизация чрез газовия поток (описан в глава I) е съпътстван с динамичното ѝ разтегляне и усукване около оста на симетрия на камерата и цилиндричния катод. Тази промяна на геометричните ѝ размери, е

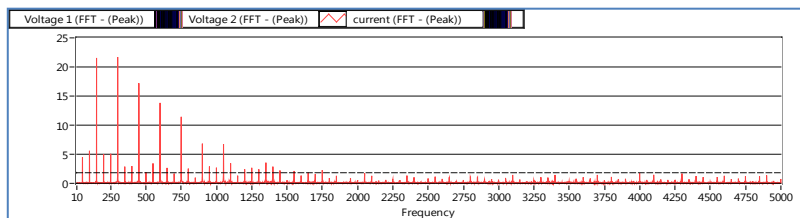
пряко свързана с промяната в пада на напрежение върху плазмения канал, което погледнато в честотната област на сигнала за изходното напрежение, се изразява в генерирането на точно определени хармоници или кратни честоти в тясна честотна лента. Анализа на спектъра на получените сигнали, дава възможност да се оптимизират технологичните и конструктивните параметри на системата за подобряване качествата на покритията.

Чрез снемането на сигналите в реално време за интервал, в който се гарантира тяхната стационарност, предвид случайният им характер на изменение, става възможно намирането на честотния спектър чрез прилагане на бързо преобразуване на Фурие (FFT). Намирането на скритите периодичности в случайните на вид сигнали като изходно напрежение и ток, може да разкрие наличието на връзка между пулсациите в размера на дъгата и ефекта от вихровата ѝ стабилизация. Наличието на корелация между ротацията на дъгата в камерата на плазмотрона и някой от висшите хармоници или група хармоници в спектъра на сигнала, освен че би потвърдило описания механизъм на процеса, но също така дава начин за въздействие върху него и стабилизирането му. Технологично това се отразява и на качеството на покритията като се осигурява повторяемост при всички напластени образци. Освен това снемането на честотния спектър на изходното напрежение и ток дава информация за ресурсния потенциал на плазмотрона и по-точно на катодата. С нарастване на отработените часове на плазмотрона, намалява дължината на катода, което увеличава дължината на дъгата и я разтяга допълнително. Този ефект причинява по-дълбоки флуктуации т.е. увеличава се тяхната амплитуда и съответно се намалява стабилността на процеса. Всичко това се вижда в спектъра на снетия изходен сигнал като промяна в нивата на установените хармоници, както и в появата на нови.

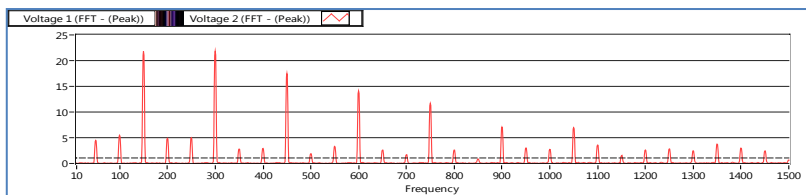
На всеки от снетите в предните параграфи сигнали, може да се приложи FFT и да се определи спектъра им. От първите описани опити в параграф V т.1 чрез измерените сигнали за напрежението и тока за малки мощности и прилагането на спектрален анализ се намира техния спектър. На фиг.4.19 са дадени спектрите на изходните величини за режим P1. Честотата на дискретизация на DAQ системата е  $f_s = 100\text{kHz}$ , което определя горната гранична честота в спектъра на измервания сигнал на  $f_h = 50\text{kHz}$ . От графиките на спектрите за двете изходни величини се вижда, че след 40-ти хармоник (2kHz), нивата им спадат под 10% от стойността на първи хармоник. Ниво 10% на графиките е дадено с пунктир.

В спектрите по-силно са изразени кратните на 3 хармоници, т.е тези с номера  $3k$ , където  $k=0,1,\dots,n-3$ , което е логично предвид шестраменния мост на УСИ, генериращ пулсации на изходното напрежение с честота 300Hz. По

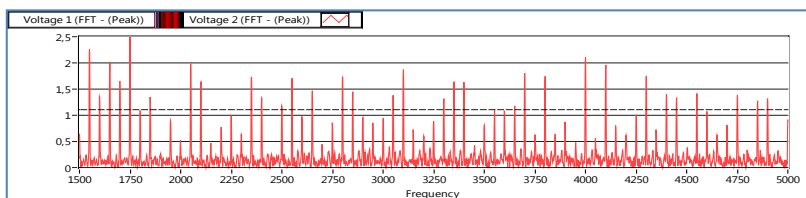
отношение на висшите хармоници, след 40-я хармоник в спектъра на напрежението в широка честотна лента присъстват хармоници с ниво около 8-9% от това на първи хармоник ( $U_{AK1}$ ).



Фиг.4.19. а) Спектър на  $U_{AK}$  до 5kHz (100-ен хармоник) при режим P1.



Фиг.4.19. б) Спектър на  $U_{AK}$  до 1,5kHz (30-ти хармоник) при режим P1.



Фиг.4.19. в) Спектър на  $U_{AK}$  от 1,5kHz до 5kHz при режим P1.

Подобна картина се наблюдава и в спектъра на тока. Там висшите хармоници съставляват 5-6% от нивото на първия хармоник ( $I_{T1}$ ). Висшите хармоници на тока най-силно са изразени в интервала от 2,4kHz до 4,6kHz, докато при напрежението, честотната лента е по широка и достига до 7,8kHz. Прави впечатление, че в областта на повишени нива на висшите хармоници в спектъра на тока се забелязват съставящи с ниски нива до 3% от  $I_{T1}$ , които не са кратни на честотата на основния хармоник – 50Hz. Това се обяснява с влиянието на запасената енергия в дросела, прескачането на приелектродните области на дъгата и разтягането ѝ, което беше описано в началото на тази глава. Наличието на пакети от импулси с различна продължителност поражда

тези висши хармоници. Тяхното местоположение и амплитуда в спектъра зависят от различните режими на работа, както и от конструктивните особености на УСИ.

В спектрите на изходните величини до 1,5kHz за изследваните режими (P2-P27), няма значителни промени от представените по-горе за режим P1. В този диапазон нивата на хармониците намаляват до около 10-12% от нивото на първия хармоник. Съществени промени има във високочестотната част на спектрите при различните режими. В тази област е обособена честотна лента с високи нива на хармонични съставки с ширина  $\Delta f = 100\text{Hz} - 1000\text{Hz}$  в областта 3 - 4,5kHz, която с нарастване на тока се разширява и се измества в областта на по високите честоти. Това се обяснява с факта, че при увеличаване на работния ток, нараства фрагментацията в изходния сигнал на тока като пакетите от импулси намаляват своето времетраене и съответно се появяват съставки с по-висока честота.

Установените по-горе влияния на основните технологични параметри върху високочестотната част на спектъра на изходните електрически сигнали доказват описаната динамика на този процес: механизма, по който се извършва разтеглянето на дъгата, шунтирането и флукуациите в нея. Центърът на високочестотната лента ( $f_H$ ) е следствие от бързината и дълбочината на тези флукуации и показва енергията, разпределена в тях. Те са индикатор за известни охладени области в температурното поле на плазмата и съответно са показател за коефициента на използване на праха (КИП) и хомогенността на покритието.

Увеличаването на азота в плазмообразуващата смес понижава нивото на високочестотните колебания спрямо първи хармоник ( $I_{T1}$ ), като това способства за по-добра хомогенност в температурното поле на плазмената струя. Установява се корелация между структурите на получените покрития (фиг.4.22, 4.23) и спектъра на измерените изходни токове (фиг.4.20, 4.21). Представени са спектри и структури, получени при режими P5 и P6 и дебит на прах  $Q_{Ni} = 400\text{gr/h}$ . Увеличаването на азота в плазмообразуващата смес, понижава нивото на висшите хармоници, което се отразява в структурата като повишение на хомогенността на покритието и съответно по-висок процент на разтапяне на праха. При режим с по-малко азот се наблюдава относително по-високо ниво на енергията при високи честоти и това довежда до наличие на пори между слоевете на покритието.

### **ИЗВОДИ**

Измерени са напрежението и тока върху плазмотрона при всички изследвани режими. Установен е характерът на изменението им и влиянието

им върху мощността на електрическата дъга. При увеличение на работния ток с до 66,67% мощността на дъгата се нараства с 86,28%.

Влиянието на дебита на аргон като плазмообразуващ газ върху мощността на дъгата е твърде слабо. Увеличаване на дебита на аргон със 100%, довежда до нарастване мощността на дъгата с 11,48%.

Добавяне на допълнителен плазмообразуващ газ оказва значителна промяна в изходната мощност на дъгата. При добавянето му и 100% увеличение на дебит на азот, мощността на дъгата се увеличава с 32,57%.

Прахът за напластяване променя мощността на дъгата и респективно енергията на плазмената струя. Увеличаване със 100% дебита на прах намалява мощността на дъгата с 3,20%.

За различните режими, при всички проведени експерименти са отчетени промяната в параметрите на флукуациите (амплитуда, период на повторение и продължителност) при измерваните напрежение и ток.

Установено е влиянието на основните значими фактори в експериментите –  $x_1$ ,  $x_3$  върху входната консумирана мощност от АПН-50. При увеличаване на работния ток с 66,67% входната мощност се повишава слабо само с няколко процента, докато добавяне на азота като плазмообразуващ газ с дебит 4 l/min. води до нарастване мощността на дъгата с до 11,86%.

Налице е корелация между спектъра на измерваните сигнали и периодичността на процесите в плазмотрона. Наблюдава се високочестотна лента на спектъра в областта 2-5kHz породена от флукуациите и завихрянето на дъгата, която зависи от избрания режим. При увеличаване на работния ток лентата силно се измества към по-високи честоти. Увеличаване дебита на азот слабо измества лентата към по-ниски честоти.

## ГЛАВА 5. ИЗСЛЕДВАНЕ СТАБИЛНОСТТА И ЕФЕКТИВНОСТТА НА РАБОТА НА ПЛАЗМОТРОНА

### КПД на плазмотрона

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 за захранване на плазмотрона води до значително намаляване себестойността на процеса плазмено-прахово напластяване.

Оценката на ефективността на апаратурата за плазмено-прахово напластяване може да се извърши чрез изчисление на КПД на целия тракт, през който се трансформира и предава енергията: от момента на

консумирането ѝ от трифазната захранваща мрежа до момента, в който тази енергия се трансформира за генериране на плазма. В целия този процес на генериране на електрическата дъга в камерата на плазмотрона, загубите на енергия са от различно естество и като цяло са изключително разнородни (излъчване, конвекция, топлообмен). В настоящото изследване е възприет интегрален подход, чрез който всички тези загуби могат да се оценят сумарно като се измери входната електрическа мощност, постъпваща на входа на апаратурата и същевременно се следи изходната мощност отделена при генерирането на дъгата. Тъй като захранващата електрическа верига е симетрична, то потребната мощност на апаратурата може да се изрази чрез:

$$P_{\text{вх}} = \sqrt{3} U_L I_L, W, \quad (5.1)$$

където  $U_L$ , и  $I_L$  са стойностите на линейните токове и напрежения.

Изходната мощност може да бъде изчислена, като се има предвид, че напрежението върху електродите на плазмотрона е изправено и теоретично от УСИ постъпва постоянна във времето мощност. Тя може да се изрази чрез:

$$P_{\text{изх}} = U_{\text{ак}} I_T, W, \quad (5.2)$$

където величината  $U_{\text{ак}}$ , е напрежението между анода и катода на плазмотрона, а  $I_T$  е работния ток протичащ в палзмения канал. На практика обаче във времето никога няма равномерно и постоянно изменение на тези величини, тъй като процесите в газоразрядната камера на плазмотрона са изключително динамични от физическа гледна точка и влияят на формата, дължината и дебелината на формираната дъга, както и на йонизираната газова област около нея, което се отразява на времедиаграмите на измерените напрежения и токове. Те са силно променливи, съставени от импулси с голяма амплитуда и стръмност. Отношението на гореописаните електрически мощности представлява електрическият КПД –  $\eta_E$  на захранващата система:

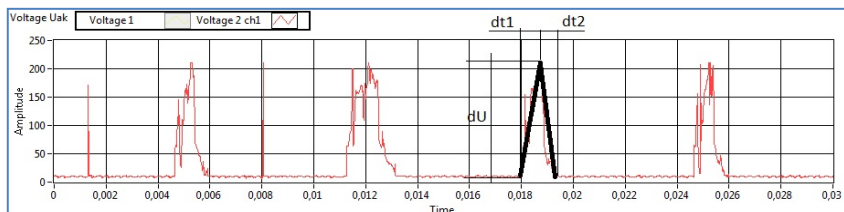
$$\eta_E = \frac{P_{\text{изх}}}{P_{\text{вх}}} \quad (5.3)$$

Общият КПД, се изменя за различните режими на работа, представени в глава IV. Той може да бъде декомпозиран по описания подход в глава III, като неговата стойност ще бъде пряк показател за ефективността на плазмотрона както и за ефективността на процеса. От направените експерименти се установява, че от особено значение за общия КПД на процеса е натоварването на източника. Електрическият КПД -  $\eta_E$  се изменя в широки граници в зависимост от натоварването на изправителя. За изчислението му е необходимо да се знае характерът на изменение както на изходната електрическа мощност, така и входната трифазна мощност. От друга страна както беше показано в глава III, топлинният КПД –  $\eta_T$  зависи основно от

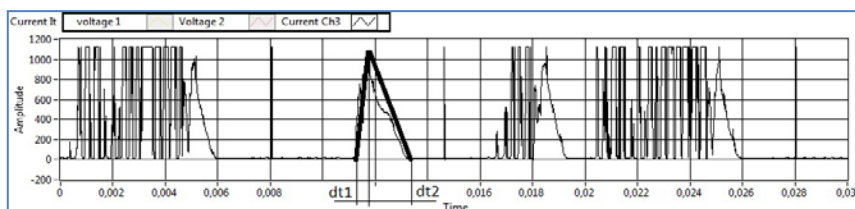
измерената температура на изхода на дюзата и дебита на плазмобразуващите газове, които в условията на експеримента са известни.

### Характер на изменение на изходната мощност.

За оценката на КПД на преобразувателя, трябва да се получи осцилограмата на изходната мощност, зависеща изцяло от измерените напрежения и ток. В глава IV са показани времедиаграмите на токовете и напреженията записани при дефинираните режими (P1-27). Те ясно показват характера на изменение на изходните величини. За напрежението тези сигнали се състоят от рязко изменящи се периодични сигнали с висока степен на стръмност на нарастване  $S_1 = \frac{dU}{dt}$  (от порядъка на 280V/ms - фиг.5.1), и почти същата стръмност на спадане  $S_2$ .



Фиг.5.1. Стръмност на нарастване и спадане на напрежителните импулси.



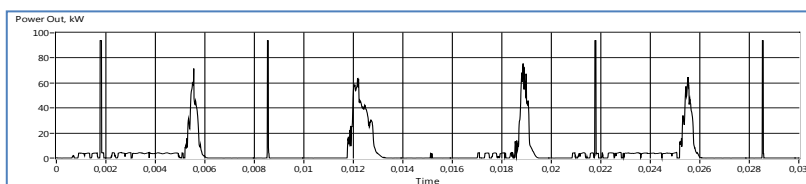
Фиг.5.2 Стръмност на нарастване и спадане на токовете импулси.

За тока към тях се добавят в отделни интервали от времето пакети импулси с малка продължителност и още по-голяма стръмност (от порядъка на 45A/μs). Същевременно стръмността на нарастване на корелиращите с напрежението импулси  $S_1$  по абсолютна стойност е по-голяма ( $S_1 = 2,2 \text{ A}/\mu\text{s}$ ) от тази на спадане  $S_2$  ( $S_2 = 0,73 \text{ A}/\mu\text{s}$ ) – фиг.5.2.

След като е ясна динамиката на записваните сигнали, за изчислението на КПД е целесъобразно да се вземе изходната мощност за цяла една реализация поради факта, че измененията на мощността във времето са още по-силно изразени, отколкото при отделните величини, от които то зависи – ток и напрежение. Времедиаграмата на мощността в изходната верига на

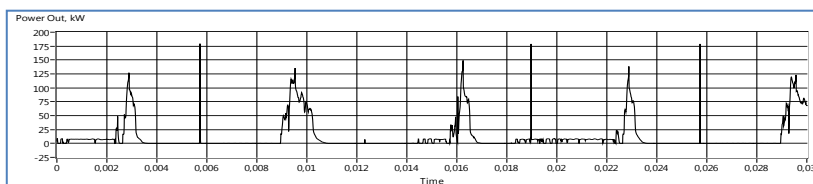
плазмотрона е представена на фигура 5.3. Ясно различни са пиковите в изходната мощност, които както се очаква корелират с тези на тока и напрежението. Характерът на изменение на импулсите в изходната мощност като цяло е подобен на този на токовите импулси със стръмен възходящ и по-полегат низходящ фронт.

Пулсиращата изходна мощност означава, че енергията консумирана от дъгата се трансформира на порции и това би се отразило на качествата на покритията. Колкото по-равномерна във времето изглежда графиката на мощността, толкова по-висока степен на хомогенност биха имали плазмено-праховите покрития.

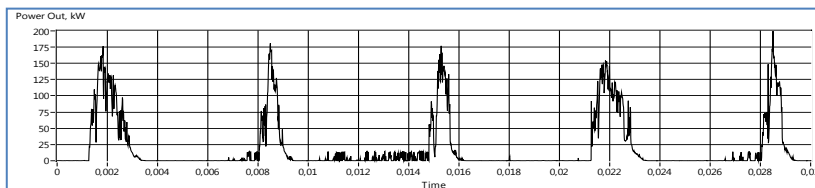


Фиг. 5.3 Времедиаграма на изходната мощност при режим P1.

Аналогично на разгледания режим при малка мощност, на фигура 5.4 е показана графиката на изменението на изходната мощност във времето за режима при ток 500A – P7. Вижда се, че структурата на изходната мощност не се променя. Промяна има само в амплитудата на съставните импулси.



Фиг. 5.4. Времедиаграма на изходната мощност при режим P7.



Фиг. 5.5. Времедиаграма на изходната мощност при режим P6 и дебит на прах  $Q_{Ni} = 500 \text{ gr/h}$ .



Подобна е структурата на мощността при промяна на отношението на плазмобразуващите газове. С увеличаването на азота, се увеличават кратковременните флуктуации в изходната мощност. Характерът на изменение на мощността е подобен на този разгледан за напрежението в глава IV. Направените там изводи за влиянието на основните режимни параметри ( $x_1 - x_4$ ) върху измереното напрежение –  $U_{AK}$ , се отнасят и за изходната електрическа мощност. Фигура 5.5 отразява тази промяна в мощността графично.

#### Характер на изменение на входната мощност.

Изменението на моментната стойност на входната мощност съответства на характера на изменение на тока и напрежението и се развива по синусоиден закон. Разликата е, че мощността е с два пъти по-голяма честота.

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_m \cdot I_m \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t + \varphi). \quad (5.4)$$

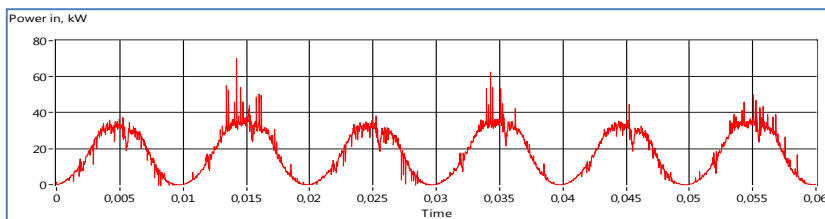
След преобразуване на израза за мощността, се достига до израза:

$$p(t) = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(\varphi) - \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(2\omega t + \varphi), \quad (5.5)$$

което показва сигнал с две съставки: променлива, с честота два пъти по-голяма от тази на тока и напрежението и наличие на постоянна съставка. След намиране на средната стойност чрез интегриране в границите на един период на израз 5.5, се получава познатият израз за активната мощност:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(\varphi) = U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (5.6)$$

където  $U$  и  $I$  са ефективните стойности на напрежението и тока, а  $\varphi$  е ъгълът на дефазироване между тях.

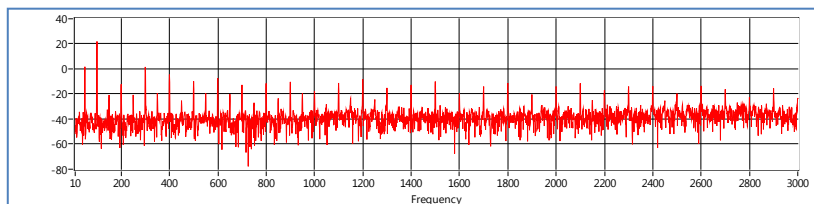


Фиг. 5.6. Времени диаграма на входната мощност (P5).

Тъй като в изразите за напрежението и тока се явяват множество хармоници, то изходната мощност също е представена от тези хармоници и техните суми. На фигура 5.6 е дадена графиката на входната мощност за една от фазите на захранващото напрежение при режим P5.

Ясно се забелязват три основни особености, които са в съответствие с гореизложените изрази: удвоена честота на променливата съставка (100Hz), наличие на постоянна съставка, увеличена амплитуда на висшите хармоници.

На фигура 5.7 е представен спектърът на входната мощност от фигура 5.6. В него се виждат удвоените честоти (кратни на 100Hz) на основните съставки и увеличеното ниво на висши хармоници.



Фиг. 5.7 Спектър на входната мощност (P5).

### Изчисление на електрическия КПД.

При разглежданите режими, с които се експериментира, двата основни компонента на КПД се изменят в определени граници и съответно се променя глобалният КПД. Таблицы 5.1 - 5.3 представят стойностите на измерените входна и изходна мощност, както и изчисления въз основа на тяхното отношение електрически КПД от изрази 5.1 - 5.6. Анализът им показва, че с нарастването на натоварването на токоизточника, се увеличава и електрическият КПД. Натоварването на изправителя се увеличава или с увеличаване на работния ток или когато се повиши дебита на плазмобразуващите газове и по-точно на азота. Като цяло входната мощност при различните режими на работа остава почти непроменена.

| Таблица 5.1 Електрически КПД при $Q_{Ar} = 20 \text{ l/min}$ и $Q_{Ni} = 0 \text{ gr/h}$ |              |       |       |              |       |       |              |       |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|------|
|                                                                                          | $I_T = 300A$ |       |       | $I_T = 400A$ |       |       | $I_T = 500A$ |       |      |
|                                                                                          | P1           | P2    | P3    | P4           | P5    | P6    | P7           | P8    | P9   |
| $P_{вх}, kW$                                                                             | 33,51        | 33,51 | 33,49 | 33,31        | 33,28 | 33,22 | 33,12        | 33,07 | 33,0 |
| $P_{изх}, kW$                                                                            | 11,5         | 15,64 | 17,92 | 17,9         | 20,88 | 22,32 | 23,95        | 27,41 | 30,5 |
| КПД, %                                                                                   | 34,32        | 46,67 | 53,51 | 53,74        | 62,74 | 67,19 | 72,31        | 82,88 | 92,5 |

При ниски нива на натоварване, голяма част от нея се разсейва в изходната филтрова група ( $L_1-C_7$ ) и по специално в изглаждащия дросел ( $L_1$ ) и захранващия трансформатор, което е причина за малкия КПД. При липса на прах за напластяване, КПД варира от 34,32% до 92,55%. Добавянето на прах в генерираната плазма, слабо увеличава КПД поради нарастването на

консумираната изходна мощност. Ефектът се поражда поради енергията необходима за преразпределение на температурното поле в дюзата, при въвеждането на металния прах чрез транспортния газ.

| Таблица 5.2 Електрически КПД при $Q_{Ar} = 20$ l/min и $Q_{Ni} = 400$ gr/h |              |       |       |              |       |       |              |       |       |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
|                                                                            | $I_T = 300A$ |       |       | $I_T = 400A$ |       |       | $I_T = 500A$ |       |       |
|                                                                            | P1           | P2    | P3    | P4           | P5    | P6    | P7           | P8    | P9    |
| $P_{вх}, kW$                                                               | 33,51        | 33,51 | 33,49 | 33,31        | 33,28 | 33,22 | 33,12        | 33,07 | 33,01 |
| $P_{изх}, kW$                                                              | 12,71        | 15,06 | 17,71 | 18,00        | 21,08 | 24,06 | 24,02        | 25,38 | 30,73 |
| КПД, %                                                                     | 37,93        | 44,94 | 52,88 | 54,04        | 63,34 | 72,43 | 72,52        | 76,75 | 93,09 |

| Таблица 5.3 Електрически КПД при $Q_{Ar} = 20$ l/min и $Q_{Ni} = 800$ gr/h |              |      |      |              |      |      |              |      |      |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------|------|------|--------------|------|------|--------------|------|------|
|                                                                            | $I_T = 300A$ |      |      | $I_T = 400A$ |      |      | $I_T = 500A$ |      |      |
|                                                                            | P1           | P2   | P3   | P4           | P5   | P6   | P7           | P8   | P9   |
| $P_{вх}, kW$                                                               | 33,5         | 33,5 | 33,4 | 33,3         | 33,2 | 33,2 | 33,1         | 33,0 | 33,0 |
| $P_{изх}, kW$                                                              | 12,6         | 15,3 | 18,1 | 18,0         | 21,7 | 24,3 | 24,1         | 25,9 | 30,9 |
| КПД, %                                                                     | 37,7         | 45,8 | 54,1 | 54,1         | 65,2 | 73,1 | 72,8         | 78,5 | 93,8 |

| Таблица 5.4. Сравнение на електрическия КПД при P14 и P5 и $Q_{Ni} = 400$ gr/h |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
|                                                                                | P13   | P14   | P15   |
| $P_{вх}, kW$                                                                   | 33,31 | 33,28 | 33,22 |
| $P_{изх}, kW$                                                                  | 19,2  | 22,4  | 24,81 |
| КПД, %                                                                         | 57,64 | 67,31 | 74,68 |
|                                                                                | P4    | P5    | P6    |
| КПД, %                                                                         | 54,04 | 63,34 | 72,43 |

При увеличаване дебита на прах до  $Q_{Ni} = 800$  gr/h, КПД достига 93,85%. За установяване влиянието на основния плазмообразуващ газ върху КПД е направено сравнение между режимите P13, P14, P15 от една страна ( $Q_N = 0-2$  l/min,  $Q_{Ar} = 30$  l/min и  $I_T = 400A$ ) и P4, P5, P6 ( $Q_N = 0-2$  l/min,  $Q_{Ar} = 20$  l/min и  $I_T = 400A$ ) от друга при  $Q_{Ni} = 400$  gr/h. Резултатът, представен в таблица 5.4

показва увеличаване на КПД с 2-3% при P13, P14, P15 ( $Q_{Ar} = 30 \text{ l/min}$ ) в сравнение с P4, P5, P6 ( $Q_{Ar} = 20 \text{ l/min}$ ) при равни други условия.

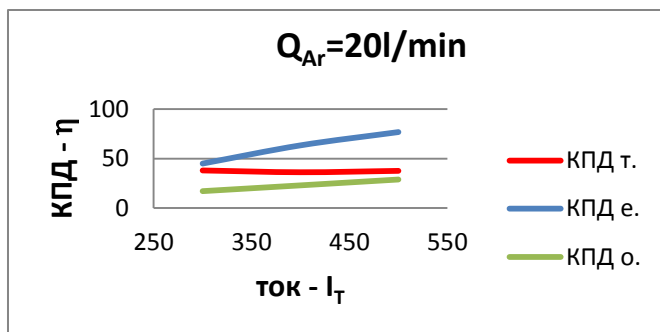
#### Изчисление на общия КПД.

Общия КПД на апаратурата за плазмено напласяване е произведение от топлинния и електрическият КПД (3.8). В таблици 5.5 - 5.7 са представени данните за топлинния КПД  $\eta_T$ . Изчисленията са направени при изходни данни за плазмотрона, константи на плазмообразуващите газове и топлинната мощност, посочени в таблици 3.5 - 3.8. Графически влиянието на работния ток върху КПД – електрически, топлинен и общ е показано на фиг.5.8 - фиг.5.10.

| Таблица 5.5. КПД при $Q_{Ar} = 20 \text{ l/min}$ и $Q_{Ni} = 400 \text{ gr/h}$ |       |       |       |       |       |       |       |      |       |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
|                                                                                | P1    | P2    | P3    | P4    | P5    | P6    | P7    | P8   | P9    |
| $P_{изх}, \text{ kW}$                                                          | 12,71 | 15,06 | 17,91 | 18    | 21,08 | 24,06 | 24,02 | 25,3 | 30,73 |
| $q_P, \text{ kW}$                                                              | 5,06  | 5,72  | 7,18  | 6,75  | 7,63  | 9,52  | 8,44  | 9,53 | 11,96 |
| е.КПД, %                                                                       | 37,93 | 44,94 | 53,48 | 54,04 | 63,34 | 72,43 | 72,52 | 76,7 | 93,09 |
| т.КПД, %                                                                       | 38,02 | 37,98 | 40,08 | 35,80 | 36,18 | 39,78 | 33,53 | 37,5 | 38,93 |
| о.КПД, %                                                                       | 14,42 | 17,07 | 21,44 | 19,34 | 22,91 | 28,81 | 24,32 | 28,8 | 36,24 |

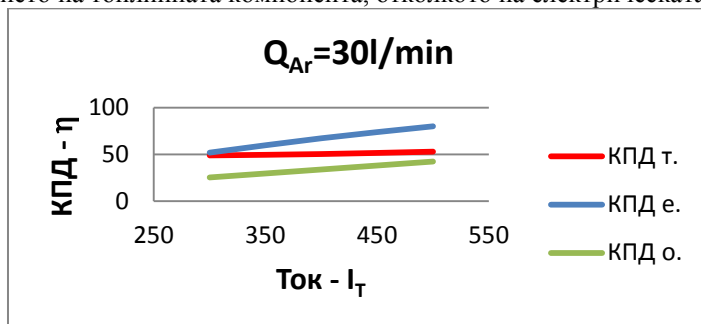
| Таблица 5.6. КПД при $Q_{Ar} = 30 \text{ l/min}$ и $Q_{Ni} = 400 \text{ gr/h}$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                                | P10   | P11   | P12   | P13   | P14   | P15   | P16   | P17   | P18   |
| $P_{изх}, \text{ kW}$                                                          | 14,1  | 17,3  | 19,15 | 19,20 | 22,40 | 24,81 | 25,10 | 26,65 | 31,20 |
| $q_P, \text{ kW}$                                                              | 7,23  | 8,48  | 8,80  | 9,64  | 11,30 | 14,05 | 12,05 | 14,13 | 17,56 |
| е.КПД, %                                                                       | 42,33 | 51,98 | 57,65 | 57,64 | 67,31 | 74,68 | 75,35 | 80,08 | 93,92 |
| т.КПД, %                                                                       | 51,30 | 49,01 | 45,98 | 50,23 | 50,47 | 56,62 | 48,03 | 53,02 | 56,28 |
| о.КПД, %                                                                       | 21,71 | 25,48 | 26,50 | 28,95 | 33,97 | 42,29 | 36,19 | 42,46 | 52,86 |

| Таблица 5.7. КПД при $Q_{Ar} = 40 \text{ l/min}$ и $Q_{Ni} = 400 \text{ gr/h}$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                                | P19   | P20   | P21   | P22   | P23   | P24   | P25   | P26   | P27   |
| $P_{изх}, \text{ kW}$                                                          | 15,5  | 18,5  | 20,9  | 20,1  | 23,1  | 25,4  | 25,9  | 27,5  | 31,5  |
| $q_P, \text{ kW}$                                                              | 9,43  | 11,04 | 13,65 | 12,57 | 14,72 | 18,20 | 15,71 | 18,40 | 22,75 |
| е.КПД, %                                                                       | 46,53 | 55,59 | 62,91 | 60,34 | 69,41 | 76,46 | 77,8  | 82,6  | 94,8  |
| т.КПД, %                                                                       | 60,82 | 59,69 | 65,31 | 62,54 | 63,74 | 71,66 | 60,67 | 66,92 | 72,23 |
| о.КПД, %                                                                       | 28,30 | 33,18 | 41,09 | 37,74 | 44,24 | 54,79 | 47,2  | 55,3  | 68,5  |



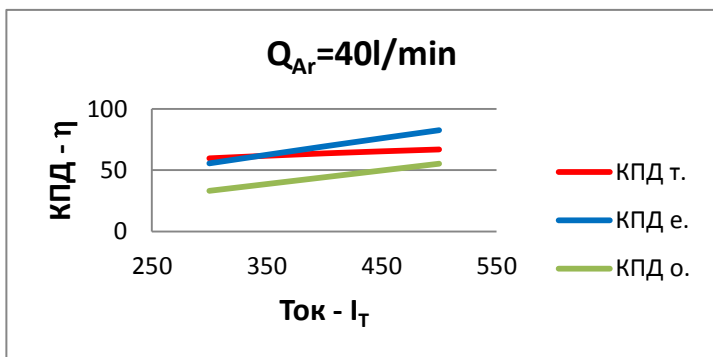
Фиг.5.8. Изменение на КПД в зависимост от работния ток при  $Q_{Ar} = 20 \text{ l/min}$ .

С нарастването на работния ток и двете съставки на КПД нарастват, като топлинния КПД се увеличава от порядъка на 2-5%, докато електрическата компонента до 27-30%, в зависимост от дебита на аргон и азот. Стръмността при изменение на дебита на аргон се запазва еднаква, като по-бързо е изменението на топлинната компонента, отколкото на електрическата.

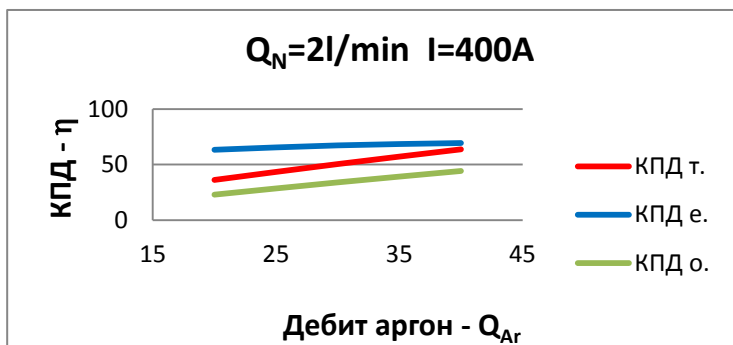


Фиг.5.9. Изменение на КПД в зависимост от работния ток при  $Q_{Ar} = 30 \text{ l/min}$ .

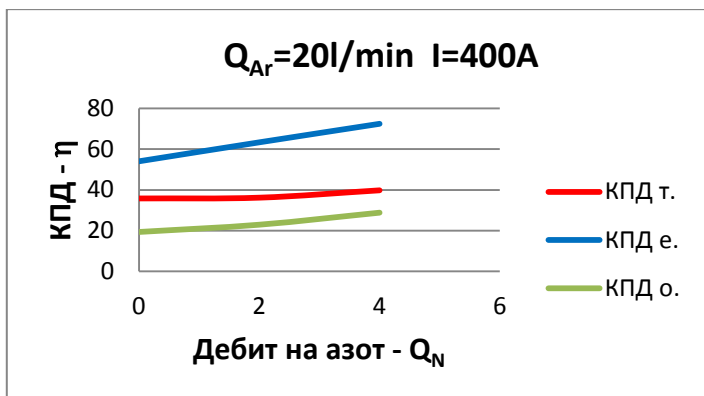
Това се вижда на фиг. 5.11, където е представена зависимостта на компонентите на КПД като функция на дебита на аргон. При изменение на дебита на аргон от 20 l/min до 40 l/min, т.е. със 100%, електрическият КПД нараства от 63 до 69%, докато топлинния от 36 до 64%. При промяна на дебита на азот, КПД се изменя значително повече съпоставимо с общото количество плазмообразуващ газ. С добавката и нарастването на азота в малки количества от 0 до 4 l/min, т.е. с до 16,7% от общия дебит на газ, електрическият КПД се увеличава от 54 до 72%, докато топлинната му съставка се променя в границите на 36-40%. Графиките на тази зависимост са показани на фиг. 5.12.



Фиг.5.10 Изменение на КПД в зависимост от работния ток при  $Q_{Ar} = 40\text{ l/min}$ .



Фиг.5.11. Изменение на КПД в зависимост от дебита на аргон при  $I=400\text{ A}$  и  $Q_N= 2\text{ l/min}$ .



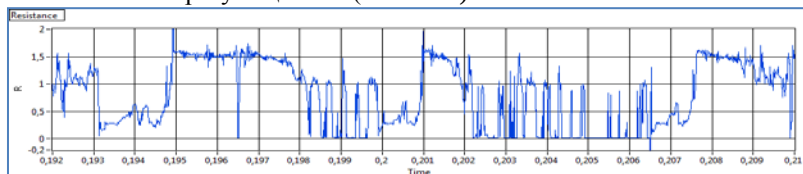
Фиг.5.12. Изменение на КПД в зависимост от дебита на азот при  $I=400\text{ A}$  и  $Q_{Ar}=20\text{ l/min}$ .

От направените измервания се установява, че добавката на азот повлиява повече електрическия КПД докато аргонът влияе повече на топлинния КПД. Това се обяснява със значително по-големия коефициент на топлоотдаване на азота от този на аргона към стените на камерата. Разликата в техните стойности е повече от три пъти. Това довежда до по-големи топлинни загуби в камерата на плазмотрона при азота отколкото при аргона и съответно по-нисък топлинен КПД при азота. Увеличаването на работния ток въздейства по-силно на електрическата компонента на КПД. Добавянето на прах за напастяване слабо увеличава КПД.

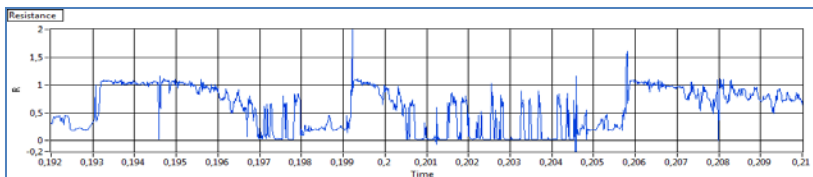
### Оценка на стабилността на дъгата

Стабилността на процеса на плазмообразуване в плазмотроните за напастяване е свързан с електрическата дъга и силно зависи от някои основни параметри на режима: състав и дебит на плазмообразуващите газове, напрежение, ток на електрическата дъга и други. Промяната на един от горните параметри в някои случаи води до резки промени на енергийните характеристики на плазмотрона, а от там и до промяна на качеството на обработваната повърхност.

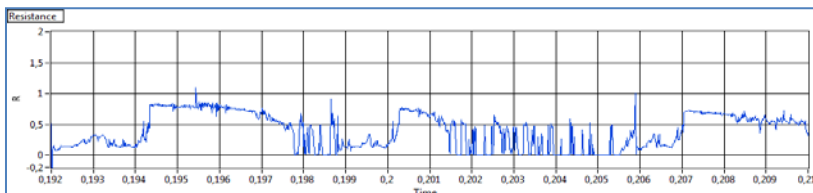
Качествена химикотермична обработка би се получила ако скоростта на генериране на плазмената струя е стабилна, което става при нисък коефициент на пулсации на изходното напрежение на плазмотрона. Следователно, мярката за устойчива работа и повторемост на процеса на напастяване е стабилността на напрежението на електрическата дъга. Наличието на стабилна във времето дъга с малки флуктуации в камерата на плазмотрона, ще доведе до равномерен по дебелина слой с константни якостни характеристики по цялата площ на обработване. В гледна точка на критериите за стабилност, важен фактор представлява изменението на проводимостта респективно съпротивлението в изходната верига. На фиг.5.13-5.14 са показани измененията на  $R$  във времето при изменение на работния ток (300A-500A) и на дебита на плазмообразуващия газ (0-4 l/min).



a)  $I_T = 300A$  (P2)



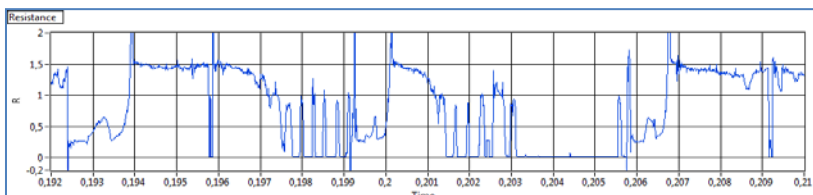
б)  $I_T = 400A$  (P5)



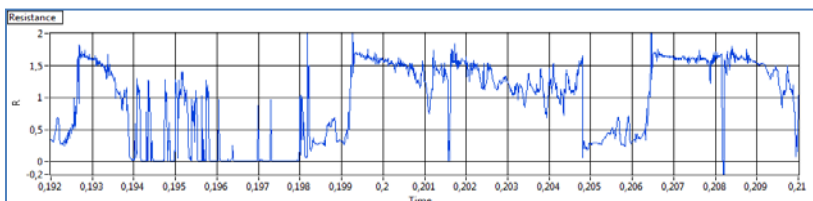
в)  $I_T = 500A$  (P8)

Фиг.5.13. Зависимост на  $R$  от работния ток  $I_T$  при  $Q_N = 2 \text{ l/min}$ ,  $Q_{Ni} = 400 \text{ gr/h}$ .

Разгледана е системата газов процес – хранващ блок, от гледна точка на електрическата стабилност. Този случай има пряко отношение към изследвания плазмотрон, състоящ се от газоразрядна камера и хранван от УСИ.

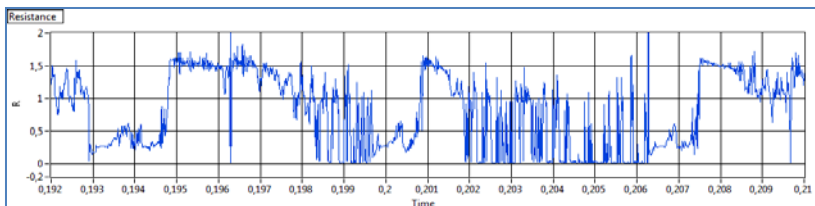


а)  $Q_N = 0 \text{ l/min}$  (P1)



б)  $Q_N = 2 \text{ l/min}$  (P2)





в)  $Q_N = 4 \text{ l/min}$  (P3)

Фиг.5.14. Зависимост на R от дебита на азот  $Q_N$  при  $I_T = 300\text{A}$ ,  $Q_{Ni} = 400 \text{ gr/h}$ .

Според израз (1.2) в глава I коефициентът на устойчивост на системата за конкретния случай придобива вида:

$$K_{CT} = \left( \frac{\partial U_{ДР}}{\partial I_{ДР}} - \frac{\partial U_{УСИ}}{\partial I_{УСИ}} \right) > 0, \quad (5.7)$$

Различните режими на работа определят стойността на  $K_{CT}$ , който може да бъде изчислен. В режимите характеризиращи се с увеличена електрическа мощност, респективно по-голям дебит на азот или работен ток, се наблюдава висока амплитуда на флуктуациите на изходните електрически параметри – напрежение, ток, мощност. На база получената ВАХ бе изчислено, че динамичното съпротивление на УСИ е отрицателно и клони към нула ( $R_{УСИ} \approx 0$ ), което означава, че изправителя като източник на напрежение слабо или почти никак не влияе върху стабилността на дъгата.

| Таблица 5.8 Данни за R, $R_{ДР}$ , $K_{CT}$ и толерансите им без прах за напластяване $Q_{Ni} = 0 \text{ gr/h}$ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                                                                                                 | P1   | P2   | P3   | P4   | P5   | P6   | P7   | P8   | P9   |
| $R_{УСИ}, \text{m}\Omega$                                                                                       | -20  | -20  | -20  | 10   | 0    | -20  | 20   | 10   | 20   |
| $R, \text{m}\Omega$                                                                                             | 700  | 840  | 840  | 560  | 560  | 540  | 430  | 420  | 430  |
| $R_{\min}, \text{m}\Omega$                                                                                      | 200  | 300  | 300  | 200  | 200  | 170  | 160  | 140  | 140  |
| $R_{\max}, \text{m}\Omega$                                                                                      | 1350 | 1550 | 1600 | 1050 | 1080 | 1000 | 800  | 760  | 760  |
| $\Delta R, \text{m}\Omega$                                                                                      | 1150 | 1250 | 1300 | 850  | 880  | 830  | 640  | 620  | 620  |
| $R_{Д}, \text{m}\Omega$                                                                                         | 305  | 330  | 262  | 253  | 246  | 150  | 224  | 201  | 114  |
| $R_{Д\min}, \text{m}\Omega$                                                                                     | 285  | 276  | 215  | 228  | 218  | 97   | 187  | 176  | 79   |
| $R_{Д\max}, \text{m}\Omega$                                                                                     | 360  | 405  | 312  | 278  | 300  | 200  | 244  | 235  | 127  |
| $\Delta R_{Д}, \text{m}\Omega$                                                                                  | 75   | 129  | 97   | 50   | 82   | 103  | 57   | 59   | 58   |
| $K_{CT}, \text{m}\Omega$                                                                                        | 325  | 350  | 282  | 243  | 246  | 170  | 204  | 190  | 94   |
| $\Delta K_{CT}, \text{m}\Omega$                                                                                 | 75   | 129  | 97   | 50   | 82   | 103  | 57   | 59   | 58   |
| $\delta K_{CT}, \%$                                                                                             | 23,0 | 36,8 | 34,4 | 20,5 | 33,3 | 60,5 | 27,9 | 31,0 | 61,7 |

Изправителя би оказал влияние при стръмно-падаща характеристика, където динамичното съпротивление би било отрицателно и с висока

абсолютна стойност. В таблици 5.8-5.10 са представени резултатите за съпротивлението на дъгата и нейното динамичното съпротивление при някои режими на работа на системата газов процеп – хранаващ блок.

| Таблица 5.9. Данни за R, R <sub>др</sub> , K <sub>СТ</sub> и толерансите им при Q <sub>Ni</sub> = 500 gr/h |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                                                                                            | P1   | P2   | P3   | P4   | P5   | P6   | P7   | P8   | P9   |
| R <sub>уСИ</sub> , mΩ                                                                                      | -20  | -20  | -20  | 10   | 0    | -20  | 20   | 10   | 20   |
| R, mΩ                                                                                                      | 820  | 890  | 840  | 550  | 540  | 530  | 340  | 410  | 420  |
| R <sub>min</sub> , mΩ                                                                                      | 300  | 300  | 280  | 200  | 200  | 180  | 160  | 140  | 150  |
| R <sub>max</sub> , mΩ                                                                                      | 1550 | 1700 | 1550 | 1050 | 1000 | 950  | 740  | 760  | 800  |
| ΔR, mΩ                                                                                                     | 1250 | 1400 | 1270 | 850  | 800  | 770  | 680  | 620  | 650  |
| R <sub>д</sub> , mΩ                                                                                        | 339  | 384  | 257  | 260  | 227  | 135  | 218  | 213  | 115  |
| R <sub>дmin</sub> , mΩ                                                                                     | 284  | 351  | 163  | 247  | 217  | 95   | 193  | 183  | 80   |
| R <sub>дmax</sub> , mΩ                                                                                     | 361  | 438  | 269  | 279  | 245  | 192  | 242  | 238  | 152  |
| ΔR <sub>д</sub> , mΩ                                                                                       | 77   | 87   | 133  | 30   | 28   | 97   | 49   | 55   | 72   |
| K <sub>СТ</sub> , mΩ                                                                                       | 359  | 404  | 277  | 250  | 227  | 155  | 198  | 203  | 95   |
| ΔK <sub>СТ</sub> , mΩ                                                                                      | 77   | 87   | 133  | 30   | 28   | 97   | 49   | 55   | 72   |
| δK <sub>СТ</sub> , %                                                                                       | 21,4 | 21,5 | 48,0 | 12,0 | 12,3 | 62,5 | 24,7 | 27,0 | 75,7 |

Представени са толерансите, максимални и минимални стойности на тези параметри като по този начин има възможност да се оцени относителното изменение на динамичното съпротивление на системата, респективно и нейната стабилност по време на работа. Представените данни са получени на база многократни измервания като за R и R<sub>д</sub>.

| Таблица 5.10. Данни за R, R <sub>др</sub> , K <sub>СТ</sub> и толерансите им при Q <sub>Ni</sub> = 800 gr/h |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                                                                                             | P1   | P2   | P3   | P4   | P5   | P6   | P7   | P8   | P9   |
| R <sub>уСИ</sub> , mΩ                                                                                       | -20  | -20  | -20  | 10   | 0    | -20  | 20   | 10   | 20   |
| R, mΩ                                                                                                       | 820  | 840  | 860  | 560  | 420  | 430  | 330  | 400  | 410  |
| R <sub>min</sub> , mΩ                                                                                       | 270  | 300  | 300  | 200  | 190  | 170  | 150  | 120  | 100  |
| R <sub>max</sub> , mΩ                                                                                       | 1500 | 1600 | 1600 | 1050 | 920  | 970  | 720  | 680  | 740  |
| ΔR, mΩ                                                                                                      | 1230 | 1300 | 1300 | 850  | 730  | 800  | 570  | 560  | 640  |
| R <sub>д</sub> , mΩ                                                                                         | 341  | 320  | 245  | 276  | 214  | 145  | 209  | 186  | 120  |
| R <sub>дmin</sub> , mΩ                                                                                      | 300  | 261  | 193  | 226  | 191  | 111  | 179  | 170  | 82   |
| R <sub>дmax</sub> , mΩ                                                                                      | 373  | 360  | 327  | 331  | 256  | 196  | 240  | 202  | 158  |
| ΔR <sub>д</sub> , mΩ                                                                                        | 75   | 99   | 134  | 105  | 65   | 85   | 61   | 32   | 76   |
| K <sub>СТ</sub> , mΩ                                                                                        | 361  | 340  | 265  | 266  | 214  | 165  | 189  | 176  | 100  |
| ΔK <sub>СТ</sub> , mΩ                                                                                       | 75   | 99   | 134  | 105  | 65   | 85   | 61   | 32   | 76   |
| δK <sub>СТ</sub> , %                                                                                        | 20,7 | 29,1 | 50,5 | 39,4 | 30,3 | 51,5 | 32,2 | 18,1 | 76,0 |

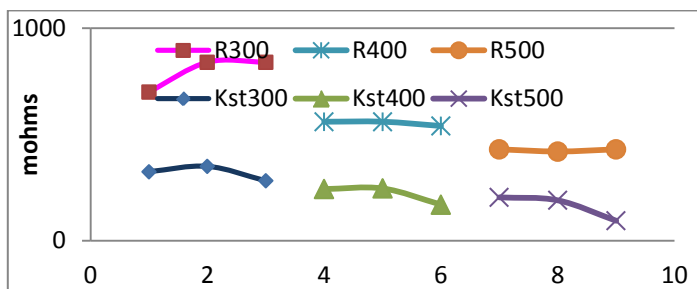
В таблиците по-горе са дадени техните средни стойности, докато  $\Delta R$  и  $\Delta R_D$ , са получени чрез разликите:

$$\Delta R_D = \Delta R_{D_{MAX}} - \Delta R_{D_{MIN}}, \quad (5.8)$$

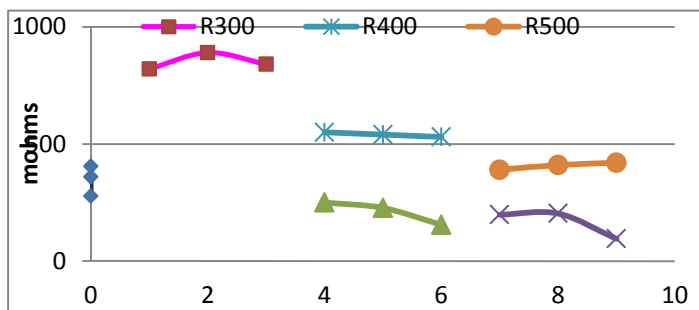
$$\Delta R = \Delta R_{MAX} - \Delta R_{MIN}, \quad (5.9)$$

където  $\Delta R_{min}$ ,  $\Delta R_{max}$ ,  $\Delta R_{Dmin}$  и  $\Delta R_{Dmax}$  са минималните и максимални стойности на тези параметри при отделните реализации на различните режими. Данните показват отклонение на съпротивлението ( $R$ ) в изходната верига в интервала 70-90% от средната стойност за всяка реализация. Динамичното съпротивление ( $R_D$ ) е с 2-2,5 пъти по-малка стойност от  $R$  и освен това по-вreme на работа се променя в по-малки относителни граници – 20-40%.

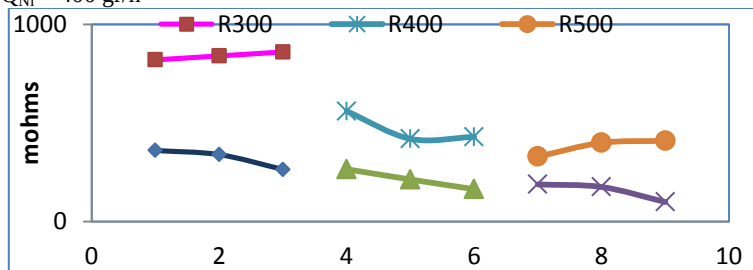
При сравнение на диференциалните съпротивления от израз 4.11 ( $R_D$ ,  $R_{ДУСИ}$ ) се вижда, че по-силно влияние върху стабилността на системата оказва параметърът  $R_D$ , защото е до 15 пъти по-голям от  $R_{ДУСИ}$ . Режимите, при които има най-малка разлика между  $R_D$  и  $R_{ДУСИ}$  са състояния на системата при които тя е най-нестабилна и евентуални флуктуации биха я извадили от равновесие. Дъгата е най-стабилна при високи стойности на динамичното съпротивление ( $R_D$ ) и големи отрицателни стойности на динамичното съпротивление на УСИ ( $R_{ДУСИ}$ ). Най-нестабилна е при високи положителни стойности на  $R_{ДУСИ}$  и при минимални стойности за  $R_D$ . От данните за представените режими (P1-P9), се установява висок коефициент на стабилност  $K_{СТ}$  при режими P1-P3 и по-ниска с увеличаването на работния ток. Най-нисък  $K_{СТ}$  се наблюдава при P9 ( $I_T = 500A$ ,  $Q_N = 4$  l/min), а най-висока стойност  $K_{СТ}$  има при P1 и P2 ( $I_T = 300A$ ,  $Q_N = 0-2$  l/min). Това се дължи на намаляване стойността на съпротивлението в изходната верига с увеличаването на работния ток. В известна степен това съпротивление е в пряка зависимост от динамичното съпротивление на дъгата -  $R_D$ , защото амплитудите на изменение във времето на  $R$  като цяло зависят от абсолютната стойност на  $R$  (фиг.5.13).



a)  $Q_{Ni} = 0$  gr/h



б) Q<sub>Ni</sub> = 400 gr/h



в) Q<sub>Ni</sub> = 800 gr/h

Фиг.5.15. Коефициент на стабилност  $K_{CT}$  при основните режими на работа (P1-P9).

Комплексното влияние на режимните параметри върху съпротивлението на изходната верига R и върху коефициента на стабилност на системата газов процеп – хранващ блок, е представено графично на фиг.5.15 при основните дебити на праха за напластяване (0-800 gr/h). Коефициентът на стабилност и съпротивлението на изходната верига имат еднакъв характер на изменение – намаляват с нарастването на работния ток.

Изменението на  $K_{CT}$  е в еднакви граници за различните стойности на  $Q_N$  от семейството характеристики. Разликата в графиките е в знака на стръмността на  $K_{CT}$ , който се сменя при различните стойности на  $Q_N$  т.е. наблюдава се нарастване или спадане на стабилността при изменение нивото на азота в плазмообразуващата смес. При липса на азот увеличаването на праха за напластяване увеличава и стабилността на системата.

### ИЗВОДИ

Установен е характерът на изменение на изходната и входната мощност.

Изчислен е електрическият КПД на системата. Той варира от 37,93% до 93,09% и нараства с увеличение на работния ток. При същите условия на

режима общия КПД се променя от 14,42% до 36,24%. С нарастване на дебита на плазмобразуващ газ, общия КПД нараства до 68,5%.

Стабилността на системата е в пряка зависимост от изходното динамично съпротивление. Неговата относителна промяна при различните реализации е в границите на 20-40%. Докато статичното съпротивление се изменя от 70% до 90%.

Коефициентът на стабилност намалява с нарастване на работния ток поради силното намаляване на стойността на статичното съпротивление. Наблюдава се максимум на  $K_{CT}$  при стойност на тока 400А.

Увеличаването на флукуациите при повече азот в плазмобразуващата смес, намаляват стабилността на системата. В границите на изследвания токов диапазон (300А и 500А) съществува максимум на  $K_{CT}$  при дебит на азот 2l/min.

Фактор  $x_4$  – дебит на праха за напастяване не оказва съществено влияние върху стабилността на процеса.

## ГЛАВА 6. МОДЕЛИРАНЕ КИНЕТИКАТА НА ПЛАЗМЕНО ГАЗОВО АЗОТИРАНЕ НА ТИТАНОВИ СПЛАВИ С ИНДИРЕКТЕН ПЛАЗМОТРОН PN50

В настоящата глава се разглежда и се моделира кинетиката на образуване на термодинамични азотирани слоеве на титановите сплави при различни условия използвайки процеса на повърхностно обработване с индиректен плазмотрон. Плазмено газовото азотиране на титан и титанови сплави с индиректен плазмотрон е динамичен процес на дифузия. Следователно, кинетиката на формиране на повърхностния азотиран слой може да бъде моделирана чрез подходящо прилагане на фундаменталната теория на дифузия. За тази цел са въведени аналитични и числени решения на базата на физически модел.

### Експериментални процедура

Моделите, разработени в дисертационния труд се основават до голяма степен на собствени експериментални резултати за азотиране на титановите сплави Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-6Al-4V и Ti-10V-2Fe-3Al. Резултатите след газово плазмено азотиране с индиректен плазмотрон с мощност 12kW, 18kW и 25kW за всичките четири сплави са използвани за моделиране. Всички проби са изследвани при стайна температура чрез оптична микроскопия, XRD анализ и измервания на микротвърдост.

### Кинетика на азотиране. Физически модел.

Формирането на азотиран слой върху титанова сплав е сложен процес и включва няколко реакции, които се провеждат едновременно на границата между газовата атмосфера и метала в рамките на субстрата. Предложеният

модел за формиране и растеж на азотираните слоеве в титановите сплави се основава на правилата на реакцията на дифузия и е за температури на азотиране под прага на бета трансформационната температура.

В повечето от случаите, основните фази наблюдавани на повърхността след азотиране на различни титанови сплави при различни термодинамични условия са  $\text{TiN}$  и  $\text{Ti}_2\text{N}$  [1-4]. Следователно предложения модел може да бъде адаптиран с достатъчна точност за моделиране на формирането на азотирани слоеве в титановите сплави. Създаването на математически модел, базиран на този физически модел за решаване уравнението за дифузия позволява количествени симулации на кинетиката на образуване на азотиран слой при различни условия на обработка, което е много важно за научно практическото приложение на титановите сплави.

Трябва да се отбележи, че присъствието на  $\text{TiO}_2$  не се взема предвид при създаването на моделите. Кислородът може да има значително влияние върху кинетиката на образуване и нарастване на азотираните слоеве, като този процес ще бъде разгледан в следващите наши изследвания. На този етап е трудно да се моделира едновременно образуване на титанови нитриди и титанови оксиди. Моделите ще работят с по-голяма точност, когато няма образуване на окиси или кислородът е в много малко количество.

### Коефициент на дифузия

За правдиво математическо моделиране на всеки процес на дифузия са необходими точни данни за коефициентите на дифузия. Литературното проучване на коефициентите на дифузия на азота в  $\alpha$  титан, обаче, разкрива някои несъответствия между дифузионните коефициенти, предложени от различни автори. Въз основа на общата форма на уравнението за коефициента на дифузия (9.1) са дадени различни стойности на  $A$  и  $Q$ .

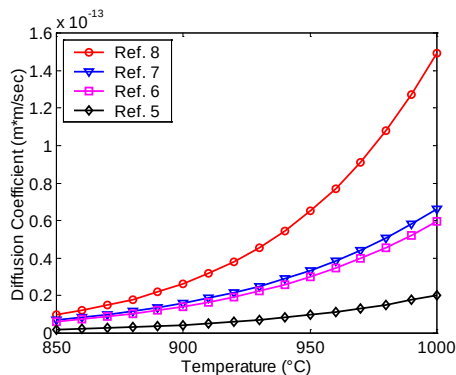
$$D = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (6.1)$$

където  $D$  е дифузивност,  $A$  е честотен фактор,  $Q$  е активизираща енергия,  $R$  е моларна газова константа и  $T$  е абсолютна температура.

Различни автори [5] съобщават за резултати свързани с коефициента на дифузия на азот в  $\alpha$ -Ti в температурния диапазон от 900-1400 °C при които коефициентите са за  $A = 1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$  и за  $Q = 189.45 \text{ kJ/mole}$ . Подобни стойности са предложени и в други източници [6] ( $A = 1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$  и  $Q = 178 \text{ kJ/mole}$ ) за същия температурен интервал и в [7] ( $A = 1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$  и  $Q = 176.9 \text{ kJ/mole}$ ) за температурен диапазон от 900-1570 °C. Различни данни за параметрите на дифузия са предложени и при [8],  $A = 9.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$  и  $Q =$

214.7 kJ/mole. Изчислена е дифузиоността на азот в  $\alpha$ -Ti с помощта на формула 2.2 и параметрите докладвани в различни източници (фиг. 6.2).

Изчисленията се извършват за температурен диапазон от 850-1000 °C, което е нормалния температурен интервал за азотиране на титанови сплави с индиректен плазмотрон. За по-нататъшно сравнение се изчислява дифузията на азот в  $\alpha$ -Ti за при мощност 18kW, което с голямо приближение съответства на температура от 935- 950 °C.



Фиг. 6.2. Дифузионни коефициенти на азот в  $\alpha$ -Ti според различни автори.

### Аналитични решения

Математическото моделиране на процесите на дифузия в материалите се осъществява чрез решаване на основното диференциално уравнение на дифузия за подходящи начални и гранични условия [9]. Ако дифузията е едномерна, т.е. има градиент на концентрация само по една ос, което е случаят при азотиране на титан и ако коефициентът на дифузия е постоянен, общото уравнение дифузия може да се опрости до:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (6.2)$$

където  $C$  е концентрацията на азот,  $t$  е времето и  $x$  е пространствената координата.

Аналитичните решения са по-прости, но са приложими за идеални начални и гранични условия. Един съществен недостатък е, че при аналитичните решения е трудно да се регламентират граничните условия в местата, в които има точка на прекъсване. В тази работа са използвани аналитични решения за първите приблизителни изчисления на градиента на азот в зоната на дифузия и дебелината на слоя при различни термодинамични условия. За да се приложи просто аналитично решение се приема, че не е

образуван повърхностния смесен слой. Това предположение е доста разумно за приблизителни изчисления и има експериментална обосновка. Експерименталните резултати за изследване на азотираните слоеве на титан показват, че дебелината на повърхностния смесен слой е в границите от 1 - 10  $\mu\text{m}$ , а зоната на дифузия е в размерността от 30 до 500  $\mu\text{m}$  в зависимост от мощността и времето на азотиране. Следователно, ако профилът на концентрация на азот и дебелината на зоната на дифузия се моделират, резултатите могат да се използват като критерий за оценка на цялата дебелина на азотирания слой.

Първото просто решение може да се получи ако се приемат прости начални и гранични условия от първи ред:

$$C(x,0) = C_0 \quad (6.3a)$$

$$C(0,t) = C_s \quad (6.3b)$$

Първото условие (уравнение 6.3a) означава, че първоначалната концентрация на азот в цялата проба е  $C = 0$ .

Второто условие (уравнение 6.3b) означава, че концентрацията на азот на повърхността приема стойност  $C_s$  от самото начало на азотиране и се поддържа при тази постоянна величина по време на процеса. Непосредствения скок на концентрацията на азот не е оправдан, защото в действителност концентрацията на азот върху повърхността постепенно се увеличава от  $C_0$  до  $C_s$  през ранния период на процеса. Въпреки това, условието за поддържане на концентрацията на повърхността на постоянна стойност  $C_s$  (след като е достигната) е правилна. Следва да се подчертае, че посоченото по-горе аналитично решение се отнася само до зоната на дифузия.

Концентрацията на азот в горната част на зоната за дифузия (при взаимодействието между съединителния слой и зоната за дифузия) се поддържа постоянна и е равна на максималната разтворимост на азот в  $\alpha\text{-Ti}$ . Тази стойност може да бъде взето от фазовата диаграма на  $\text{Ti-N}$ .

Решавайки уравнение 6.2 в началните условия от 6.3 се получава:

$$C(x,t) = C_0 + (C_s - C_0)(1 - \text{erf}(\eta)) \quad (6.4a)$$

$$\text{където} \quad \eta = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (6.4b)$$

Използвайки тези уравнения, профила на азот в зоната на дифузия се изчислява след азотиране при  $18\text{kW}(950\text{ }^\circ\text{C})$  в продължение на 10, 15 и 20 min. За  $C_s$  е използвана стойност от 6% wt%, която е взета от фазова диаграма на  $\text{Ti-N}$ . Профилите на азотна концентрация се изчисляват за дифузионни коефициенти, предложени от различни автори и резултатите са сравнени с експериментални резултати за дълбочината на азотирания слой.



Експерименталните стойности са получени от микротвърдостните профили – на предходни изследвания. По-реалистично аналитично решение може да бъде получено чрез прилагане на гранични условия от трети ред. Ако потокът от азотни атоми през граничния интерфейс ( $J_N$ ) е пропорционален на разликата между равновесие ( $C_s$ ) и ток ( $C(0,t)$ ) концентрацията на азот в границите на граничното условие се изписва като:

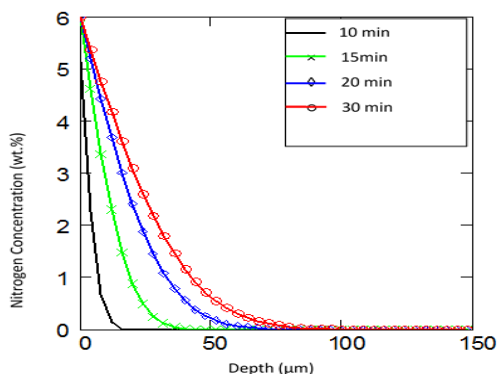
$$J_N = -D \frac{\partial C(0,t)}{\partial x} = \alpha(C_s - C(0,t)) \quad (6.5)$$

където  $\alpha$  е коефициент в m/s.

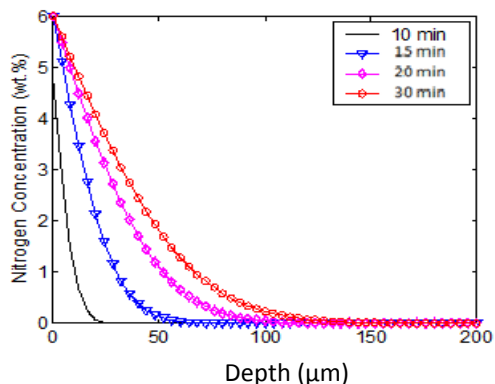
Това състояние проследява реалистично развитието на профила на азот в зоната на дифузия. Концентрацията на азот на границата се увеличава постепенно от нула (или друга стойност) до равновесната концентрация ( $C_s$ ) и се поддържа при тази стойност след това. Това са реални условия за развитието на зоната на дифузия при азотиране на титанови сплави. Един недостатък на тава гранично условие е, че алфа коефициентът е неизвестен. Това зависи от много фактори и варира значително за различни условия. За да се получи коефициента  $\alpha$  са необходими множество експериментални данни.

Аналитичното решение на уравнение 6.2 при гранични условия 6.5 е:

$$C(x,t) = C_s \left( \operatorname{erfc}(\eta) - e^{\left( \frac{a^2 t}{D} + \frac{2\alpha\sqrt{t}\eta}{\sqrt{D}} \right)} \operatorname{erfc} \left( \eta + \frac{\alpha\sqrt{t}}{\sqrt{D}} \right) \right) \quad (6.6)$$



Фиг. 6.4. Изчислени профили за концентрацията на азот в дифузия слой за различно времетраене на азотиране при 12kW(900°C).



Фиг. 6.5. Профили на азотна концентрация в дифузия слой за различно времетраене на азотиране при мощност 18kW(9500C) и експериментални микрографии на азотирана сплав Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo

Решението на (6.6) се използва за моделиране на еволюцията на азот в зоната на разпространение по време на азотиране на Ti-6Al-4V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo и Ti-8Al-1Mo-1V. Стойността на  $\alpha$  е получена чрез адаптиране на резултатите от моделирането към експериментално наблюдавани нитрирани слоеве. Най-добро съответствие между моделиране и експериментални резултати се получава за  $\alpha = 2.55 \times 10^{-8}$  m/sec. Резултатите от симулацията след азотиране при 12kW(900°C) и 18kW(950 °C) за различни периоди от време са представени съответно на фигури 6.4 и 6.5. Резултатите от симулацията показват, че концентрацията на азот в повърхността постепенно се увеличава с развитието на концентрационен градиент.

Концентрацията на азот при повърхността достига стойност от 4.5 wt.% след 10 минути азотиране при двата режима, но процеса все още не е в равновесие. След 15 минути азотиране с индиректен плазмотрон концентрацията на азот в  $\alpha$  фазата на повърхността вече достига равновесни стойност от 6 wt.%. Това означава, че вече има формиран титанов нитрид. Тези симулационни резултати са в съответствие с експерименталните резултати от рентгеновия анализ при мощност 18kW за време 15min. Наблюдава се добро съответствие между моделираните и експерименталните резултати по отношение на развитието на дълбочината на азотирания слой.

Следва да се отбележи, че аналитичните решения, описани по-горе могат да се използват само за описване развитието на дифузионната зона. Някои аналитични решения са възможни да се приложат за моделиране и на образуването на цели слоеве при определени условия на дифузия. Въпреки

това, се предпочита да се използва компютърна симулация за моделиране на целия физически модел, представен по-горе.

### Числени симулации и входни параметри

В допълнение към аналитичните решения е разработен математически модел и програмен пакет за компютърна симулация на процеса на азотиране на титанови сплави. Математическият модел, на базата на физически модел, описан по-горе, решава проблема с граничните условия на дифузия [13] и пресмята едновременно дифузията на азот в  $\alpha$ -Ti и развитието на повърхностния слой, състоящ се от TiN и Ti<sub>2</sub>N.

Гранични условия от трети ред се използват за моделиране на движението на азота, от повърхността към нереагиращата твърда основа. Коефициентът на дифузия се приема, че не зависи от концентрацията на азот. Нарастването на тази зона е описано от гледна точка на масовия баланс между фазите в термодинамичното равновесие. Моделът може да прогнозира взаимодействието на азота, дълбочината на слоя и времето за формиране на слоя.

Уравнението за дифузия в областите, заети от различни фази се решава по метода на крайните елементи. Избраните елементи имат размери в пространството и времето. Това позволява лесно определяне на позицията на взаимодействието между различни фази. Методът по същество е имплантирана времево усиляваща се техника и следователно е стабилна дори за относително голяма времева стъпка.

Решението на проблема включва дифузия през две съседни единични фази а и b, които са разделени от подвижна граница. Като цяло, дифузиите във всяка фаза  $D_a$  и  $D_b$  не са равни и концентрацията има прекъсване през границата. Приема се равновесие при интерфейса и междуфазовия състав, като двете фази се изчисляват от диаграмата на фазовото равновесие.

Реакциите на трансфер на маса определят условията при граничната повърхност на процеса. За плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон могат да се прилагат условията на гранична повърхност от трети ред:

$$-D \left. \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = K(a - C(x,t)) \Big|_{x=0} \quad (6.7)$$

където  $C(x,t)$  е концентрационната дълбочина  $x$  и време  $t$ ,  $D$  е дифузионния коефициент,  $K$  е коефициент свързан със скорост на реакцията и  $a$  е потенциалът на дифузия в атмосферата.

В еднофазовия регион се използва обикновен модел на дифузия. Първият закон на Фик, свързан с потока и градиента на концентрацията, при изотермична, изобарна дифузия се изразява както следва:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (6.8)$$

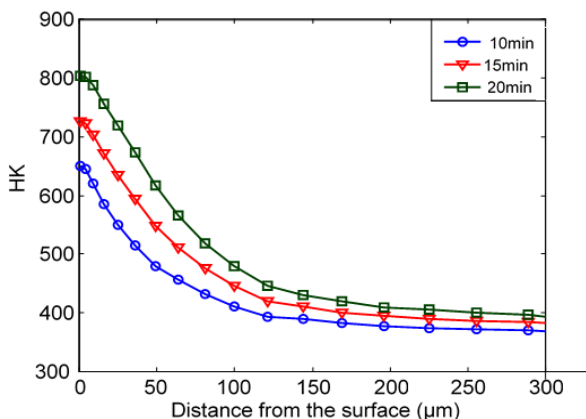
Описването на реакцията след това изисква:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(-J) \quad (6.9)$$

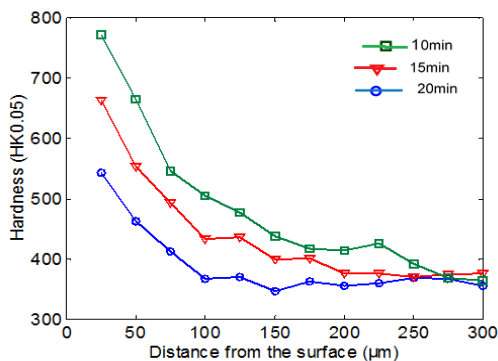
Масовият баланс трябва да бъде поддържан в интерфейса. Масовият баланс в интерфейса се определя от отношението на активния и пасивния поток азот чрез интерфейса чрез:

$$D_a \left. \frac{\partial C_a}{\partial x} \right|_{x=\xi} - D_b \left. \frac{\partial C_b}{\partial x} \right|_{x=\xi} = (C_b - C_a) \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (6.10)$$

където  $D_a$ ,  $D_b$ ,  $C_a$  и  $C_b$  са дифузионните коефициенти и интерфейсови концентрации в съответстващите фази.  $\xi$  е позицията на интерфейса и  $\frac{\partial \xi}{\partial t}$  индикира скоростта на нарастване на слоя. Скоростта на разместване на прекъсването  $\frac{\partial \xi}{\partial t}$  е определена от уравнението (6.10).



a)

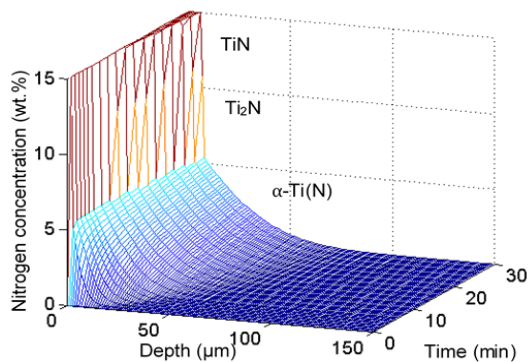


б)

Фиг. 6.6. Числени симулации за развитието на повърхностния слой след плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон на Ti-8Al-1Mo-1V при мощност 18kW за време 10, 15 и 20 min – а) теоритични; б) експериментални.

Моделът основан на числени симулации се използва за разработване на софтуер за контрол на процеса на азотиране на повърхности на титан и титанови сплави при различни условия на обработване с индиректен плазмотрон PN50. Входни данни: мощност, респективно температура на обработваната повърхност, коефициент на дифузия (енергията на активиране и пре-експоненциално условие) и максимално допустими концентрации на различните фази формирани в процеса на азотиране.

Производителността на създадения модел е тестван чрез сравняване на симулационни резултати с експериментални данни. Изчислени са азотни профили в повърхностния слой след плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон при мощност 18kW (950 °C) за време от 10, 15 и 20 минути. Изчислените резултати са сравнени с експериментални данни за титанова сплав Ti-8Al-1Mo-1V след азотиране за същата температура и време. Наблюдават се висока степен на еднаквост между моделираните и експериментални резултати. В резултат на това, използвайки на най-добрите параметри за дифузия за всяка сплав, моделите могат да се използват за прогнозиране профили на азотна концентрация и дълбочина на слоевете по експериментален път и температурен диапазон. Моделът може да се използва за оптимизиране на параметрите на обработка (температура и време) на азотиране, за да се постигне желаната дълбочина на повърхностния слой. Компютърните симулации, извършени за Ti-8Al-1Mo-1V при мощност 12 kW и 18kW са показани на фиг. 6.7., където се наблюдава развитието на азотирания слой.

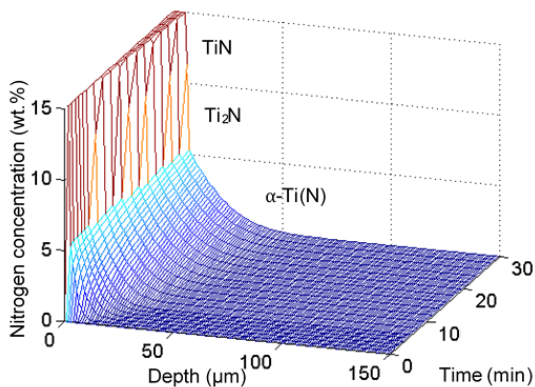


Фиг. 6.7а. Числени симулации за еволюцията на повърхностния слой по време на азотиране при 12kW за Ti-8Al-1Mo-1V.

Може да се види, че дебелината на слоевете се увеличава с увеличаване на времето и температурата на азотиране. Резултатите са в съгласие с теорията за дифузия и собствените експериментални резултати.

Налице е по-висока концентрация на азот в азотирания слой след 15 min време на насищане. Това води до ефективно производство на азотирани слоеве с достатъчна дълбочина и с по-високи стойности на микротвърдостта.

Друг пример може да се даде за Ti-6Al-2Sn-4Sn-2Mo нитрирана при 840°C, използвайки данните за дифузия от Таблица 6.3 (фиг. 6.8).



## **ИЗВОДИ**

Разработени са модели за симулация и мониторинг на развитието на повърхностните слоеве по време на плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон на титанови сплави. Моделите се основават на анализ и числени решения на уравнението на дифузия. Те са полезни инструменти за оптимизиране на параметрите на повърхностно азотиране на титанови сплави.

Създаден е програмен пакет за цифрова симулация на процеса на азотиране на титанови сплави. Най-добри данни се получават за титанови сплави Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-6Al-4V и Ti-10V-2Fe-3Al. Използвайки тази информация, числени симулации и прогнози на разпределението на азот, дебелината на азотирания слой и времето за формиране на азотираните слоеве могат да се послужат при създаване на технологии за повърхностно плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон.

## **ГЛАВА 7. ИЗСЛЕДВАНЕ ДИЗАЙНА НА ДЕНТАЛНИ ТИТАНОВИ ИМПЛАНТИ**

### **1. Общи характеристики**

Титановите дентални импланти са най-често използваните успешни импланти, но дори и при тях има рискови фактори, които могат да попречат на осъществяването на процеса на остеоинтеграция. Това са различни бактериални инфекции както и неподходящи конструкции водещи до неравномерност на натоварването върху челюлната костна структура.

Предвид тези фактори на влияние върху дизайнът на имплантите в дисертационния труд са разработени и предложени конструкции на дентални импланти отговарящи на стоматологичните изисквания. Дефинирани са подходящи размери на височина и в диаметър. Външния профил на имплантите е цилиндричен със симетрична резба. Връзката с надстройката е вътрешно конусна с шестограм осигуряващ надежно фиксиране към абатмънта.

Често пъти производството на дентални модели се предхожда от симулативни процеси, анализиращи здравината на виртуалните образци. Това става възможно в САЕ среда, където моделите се изследват по метода на крайните елементи. За да стане възможно това е необходимо, виртуалните модели да притежават твърдотелна структура [14]. Това от своя страна поставя редица въпроси възникващи по време на конструирането на 3D моделите. Качеството на дизайна на разработваните образци зависи от прецизната изработка на геометрията и спазване на конструктивните особености. От дизайнерска гледна точка се знае, че твърдотелното и мрежовото моделиране

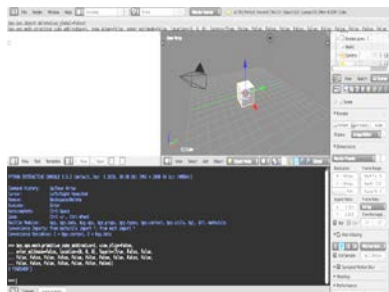
имат своите преимущества и недостатъци в зависимост от по-нататъшното използване на разработваните 3D модели. Твърдотоделното моделиране предоставя възможност за непосредствено изследване качеството и здравината на разработените модели, но има своите ограничения в процеса на конструиране, където конструирането на определени специфични геометрични елементи е проблематично. Това може да се реши, ако се използват ресурсите на 3D графични програми работещи с полигонални мрежи и криви. Добра възможност се явява Blender софтуер, който освен безплатния си лиценз, предоставя добра среда за разработване на 3D геометрични модели, по мрежови път, чрез използване на криви, параметрично чрез специализирани приложения, както и прилагане на програмния език Python.

За нуждите на настоящото изследване е предложена методика, която съдържа основни етапи на трансфер на информационни данни за нуждите на денталната индустрия. Методиката съдържа:

- Създаване на 3D геометрични обекти в среда на Blender, чрез използване на програмния език Python и писане на кодове;
- Работа с 3D геометрични модели в Blender software посредством: индивидуална ръчна обработка; параметрично моделиране чрез специализирани приложения Human Teeth addon и Open Denatal CAD addon; трансфер на информационни данни в \*.dxf файлове;
- Създаване на твърдотоделност на полученните 3D модели за нуждите на денталната индустрия.

## *2. Създаване на тримерна геометрия чрез писане на програмни кодове*

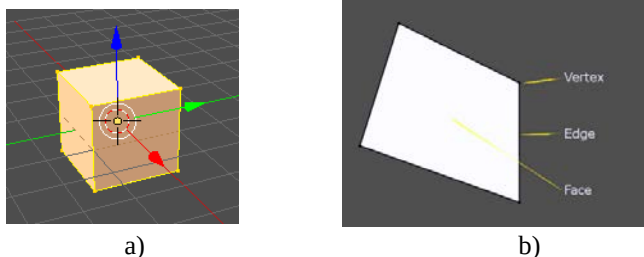
Програмата Blender позволява да се работи с програмния език Python директно в своята работна среда, секция Scripting. Последната версия на Blender (Март 2017) е 2.78с, работеща с Python Interactive Console 3.5.2 (default, Dec 1 2016).



Фиг. 7.2. Конструиране на 3D примитив куб чрез писане на код в Python



На фиг. 7.2 е показан интерфейс на Blender софтуер (секция Scripting) с въведения код, който конструира първоначален 3D модел на примитив куб.

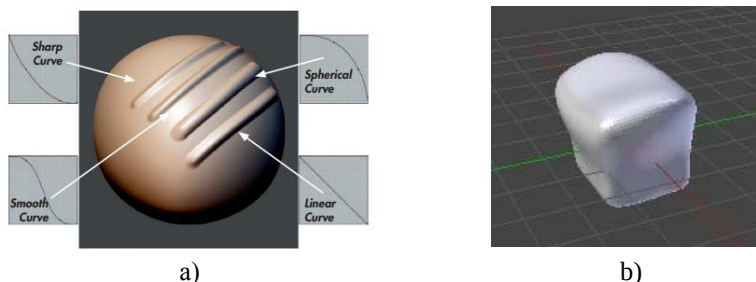


Фиг. 7.3. Модел на 3D примитив куб (a) Edit Mode; (b) Трите основни съставляващи мрежата (mesh) в Blender: vertex, edge и faces

Изграждащите се 3D модели в Blender software се получават вследствие работата с криви или полигонални мрежи. Вече получения 3D модел на примитив куб притежава ограничен брой върхове (vertex), ръбове (edges) и повърхнини (faces), чиято структура е показана на (фиг. 7.3).

### 3. Моделиращи възможности и параметрично проектиране с допълнителни приложения addons

В зависимост от заданието какъв трябва да бъде 3D модела, то той може да бъде и с друга геометрична форма. Счита се, че 3D моделът куб притежава подходяща базова геометрия, която чрез преработване може да придобие желаната крайна форма било то зъб, корона, имплантен компонент и др.



Фиг.7. 4. Процес на създаване на 3D модел на коронка (a) моделиращи възможности на Sculpt Mode; (b) процес на конструирание на дентална коронка или зъб

Получаването на готовия дентален модел от примитив куб подлежи на последователни стъпки съчетаващи различни техники за моделиране като: работа с мрежата и/или специфичната възможност за 3D склуптуриране в

Blender с Sculpt Mode. Използвайки подходящите склуптуриращи инструменти (фиг. 7.4 (а)) се конструира модел на дентална коронка или зъб (фиг. 7.4 (б)). За постигане на качествени резултати е желателно да се прилагат комбинирани техники включващи работа с мрежата, модификатори, склуптуриране както и специализирани инструменти и модулни приложения съдържащи готови разработени дентални образци. Напълно достъпни с безплатен лиценз са Human Teeth addon и Open Denatal CAD addon. Това са приложения, които са специално разработени за нуждите на 3D моделирането на tooth, jaws, tishu and dental implants, abutments and crowns и съвместими с последната версия 2.78 на Blender.

#### *4. Създаване на твърдост*

Полигоналните мрежи и криви дават възможност да се конструират тримерни модели със сложна геометрия. Това е добра възможност да се допълнят проектантските възможности в CAD системите, където разработването на дентални компоненти съдържащи много криви форми, закръгления и повърхнини е затруднено. Това се дължи на твърдотелната структура на моделите, които се използват за изследователски и производствени цели и нужди. Отнасяйки се към съвременната денталната имплантология, където е необходимо наличието на анатомични данни, оптимизирането на проектантските възможности за разработването на имплантни компоненти предназначени за тримерен печат е от голямо значение. От образците, показани на фиг. 7.5 е видно, че импланта от фиг.7.5 (а) има права форма, докато този от фиг. 7.5 (б) има сложна крива форма.



a)



b)

Фиг.7. 5. Имплантни модели (а) винтов; (б) по формата на корена

Това е особеност, която успешно се реализира в среда на Blender използвайки методологичните насоки описани по-горе. Когато работата по конструирането на 3D моделите е осъществена, готовата геометрия се трансформира в твърдотелна в среда на SolidWorks. Това става чрез трансфер

на данните във файлов формат \*.DXF и последваща обработка в CAD системата, спазвайки методологичните изисквания за работа с криви, повърхнини, мащабиране и създаване на твърдост.

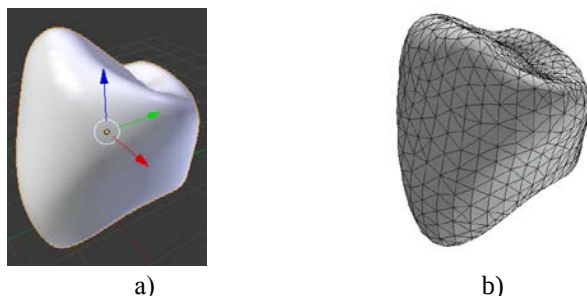


Фиг. 7.6. Процес на трансфер на геометрични данни от Blender в CAD системата SolidWorks

За изследователски нужди и цели се задава материал на образците (physical material), съответно титан, цирконий и други. Процесът на трансфер на геометрични данни от Blender в CAD системата SolidWorks е показан на фиг.7. 6.

### *5. Получаване на твърдост и мрежово визуализиране*

Съвременната дентална индустрия обхваща различни дейности и приложения. Една от тях е разработването на дентални коронки за зъби или имплантни конструкции. За разлика от имплантните конструкции, тримерната геометрия на коронката трябва да има сходна анатомична геометрия на формата на зъба. Тя съдържа сложна комбинация от геометрични форми. Спазвайки разгледаната методика в последователност се конструира 3D модел на денталната коронка (фиг. 7.7).



Фиг.7. 7. Получаване на твърдост и мрежово визуализиране (a) 3D модел на дентална коронка (b) детайлна визуализация на получената мрежа

Полученият твърдотелен модел в SolidWorks позволява вследствие на дискретизирането му да се изследва на статични, циклични, нелинейни и други

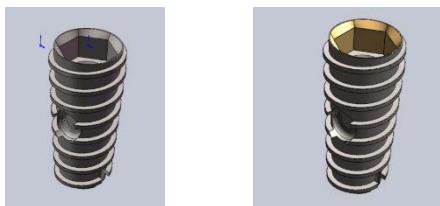
натоварвания. Резултатите от изследванията са с голяма точност на базата на прецизно изработената геометрия на модела.

Създаването на този и друг вид дентални компоненти с разработената методика значително ще улесни и подобри денталната индустрия.

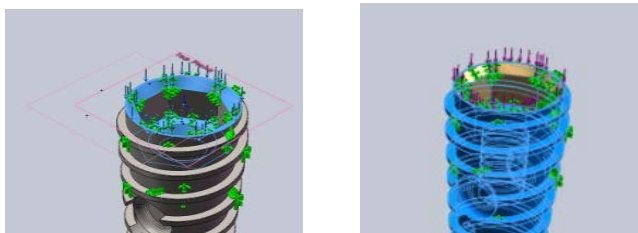
Разработени са 3D модели чрез SolidWorks на дентални импланти. Дизайнът е реализиран в реални образци. На фиг. 7.8 е показан 3D модела участващ в изследването, като на същия бе нанесено и златно покритие.

От голямо значение за точността на изследването е дефинирането на начина, по който компонентите влизат в контакт. Определени са Bonded / Compatible mesh за Global Contact. Изчислителният модел е монолитен (държи се като едно цяло). Генерираната мрежа е съвместима (граничните възли са общи за отделните детайли). За Contact Sets (Контактни групи) са определени Bonded (Свързан/ Избраната група компоненти се държат като едно цяло).

Поради факта че златното покритие е с размер от 3 до 5 микрона за всички изследвания са изградени мрежи с размер на елементите 0.06 mm.



Фиг. 7.8. 3D модели на титановите дентални импланти и покритието от злато визуализирано като отделен модел



a)

b)

Фиг. 7.9. Коефициент на сигурност (визуализирано изображение на импланта с показано най - натоварено място) на Дентален имплант(a) и Дентален имплант със златно покритие (b)

Резултатите от изследванията за получените най - малки стойности на Коефициент на сигурност (FOS) са показани на таблица 7.2 по съответна последователност.

Визуализация на получените резултати на Коефициент на сигурност (FOS), от статичните изследвания с приложена сила 300N са показани на: фиг. 7.9 за Дентален имплант и такъв със златно покритие. От визуализациите може да се проследят зоните подложени под най - голямо натоварване.

### **ИЗВОДИ**

Реалното производство на денталните компоненти включва различни технологии в зависимост от конкретните задания и дейност. Наличието на правилни геометрични данни за 3D денталните модели има голямо значение както за качеството на реално произведените компоненти, така и в процеса на изследване дизайна на здравина в CAE системите. Предвид сложното твърдотоделно моделиране в CAD системите, поради спецификата на тримерната структура на моделите, то добра възможност е използването на ресурсите на 3D графичните програми, където е улеснено моделирането на специфични геометрични елементи посредством полигонални мрежи и криви. Това способства за израждането на точна 3D геометрия на денталните компоненти, които чрез използването на специфични моделиращи техники се преобразуват в твърдотоделни модели, които стават приложими за денталната индустрия. Оптимизирането на този процес може да се подобри като предварително се изгради база данни от 3D модели на дентални компоненти чрез писане на програмни кодове. По подобен начин могат да се създадат и приложения addons, посредством които параметрично да се проектират тримерни дентални компоненти.

В настоящия раздел е разработена напълно действаща методика в структурирани етапи. Посредством нея се оптимизират проектиращите възможности и трансфера на информационни данни на 3D денталните компоненти за нуждите на денталната индустрия. Подробно са разяснени етапите по израждането на специфична тримерна геометрия и асоциативното взаимодействие на програмните ресурси довеждащи до подобряване изследователските и производствените резултати.

Резултатите от цикличните натоварвания дават предварителна представа как ще реагира на продължителни дъвкателни натоварвания новосъздадения дизайн на имплантите и такива с нанесено златно покритие. Това се отнася и за използваните материали. Изследванията са за 8000000 цикъла при натоварване на приложената сила със стойност 300N.

## ОСНОВНИ ИЗВОДИ ОТ ДИСЕРТАЦИЯТА И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ЗА ПРАКТИКАТА

На база на направените експерименти и анализи на получените резултати в дисертационния труд са формулирани следните основни изводи:

- Титановите сплави притежават висока относителна якост, висока температура на топене, добра граница на умора, висока устойчивост срещу образуване на пукнатини, отлична якост при високи работни температури и корозионна устойчивост в различни условия на експлоатация. Уникалната комбинация от добри механични свойства, ниска плътност и добра корозиоустойчивост ги прави привлекателен и перспективен материал за приложение в инженерството за изработка на различни отговорни детайли и конструкции.

- Оценени са основните фактори, влияещи на процеса плазмено напастяване. Разработени са математически модели за определяне тежестта на влияние на всеки от значимите фактори, като с най-висока степен на влияние от всички фактори са работен ток и дебит на азот. В по-слаба степен е влиянието на дебит на аргон и дебит на прах.

- Проверени и доказани са адекватността на моделите чрез критерия на Фишер, като за модела на КПД е получена стойност  $F=1,7$ , а за модела на коефициента стабилност  $F=2,27$ .

- Създадена е принципна схема и е направена декомпозиция на енергията вложена при процеса.

- Доказано е, че сигналите чрез които се изследват режимите са стационарни и ергодични. Това дава възможност за точна обработка и интерпретация на измерените величини.

- Установен е характерът на изменението на напрежението и тока и влиянието им върху мощността на електрическата дъга на на индиректен плазмотрон плазмотрон. При увеличение на работния ток с до 66,67% мощността на дъгата се нараства с 86,28%.

- Доказано е, че допълнителен плазмообразуващ газ оказва значителна промяна в изходната мощност на дъгата. При добавянето му и 100% увеличение на дебит на азот, мощността на дъгата се увеличава с 32,57%.

- Установена е корелацията между спектъра на измерваните сигнали и периодичността на процесите в плазмотрона. Наблюдава се високочестотна лента на спектъра в областта 2-5kHz породена от флуктуациите и завихрянето на дъгата. Тази част от честотния спектър зависи от избрания режим. При увеличаване на работния ток лентата силно се измества към по-високи честоти. Увеличаване дебита на азот слабо измества лентата към по-ниски честоти.

- Установено е, че стабилността на системата е в пряка зависимост от изходното динамично съпротивление. Неговата относителна промяна при различните реализации е в границите на 20-40%. Докато статичното съпротивление се изменя от 70% до 90%.

- Установено е, че увеличаването на флукуациите при повече азот в плазмообразуващата смес, намаляват стабилността на системата. В границите на изследвания токов диапазон (300A и 500A) съществува максимум на  $K_{CT}$  при дебит на азот 2l/min.

- Разработени са модели за симулация и мониторинг на развитието на повърхностните слоеве по време на плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон на титанови сплави. Моделите се основават на анализ и числени решения на уравнението на дифузия. Те са полезни инструменти за оптимизиране на параметрите на повърхностно азотиране на титанови сплави.

- Създаден е нов дизайн на дентален имплантит изработен от титанова сплав Ti-6Al-4V.

- Извършени са изследвания в компютърна среда SolidWorks, чрез CAE модулът Simulation и е установена реакцията на новосъздадения дизайн на имплантите при продължителни дъвкателни натоварвания.

- Установено е, че при по - големи натоварвания от 300N златното покритие може да изгуби своите еластични качества и да навлезе в зона на пластичност.

- Установено е, че златното покритие предпазва тънкостенните участъци на вътрешнокостната част на импланта и евентуалните нарушавания при целостта на обкръжаващата импланта кост. Това може да доведе до компрометиране процеса на остеоинтеграция. Добавянето на покритие от златно върху определени елементи от импланта е нов и модерен метод в областта на денталната медицина.

## **ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА**

От извършената работа по дисертационния труд бяха формулирани следните приноси:

### **1. Научни приноси:**

1.1. Разработени са методики за анализ и оценка на основните фактори, влияещи върху процеса плазмено напластяване. Разработените математически модели дават оценка за тежестта на влияние на всеки от значимите фактори.

1.2. Разработени са модели за симулация и мониторинг на развитието на повърхностните слоеве по време на плазмено газово азотиране с индиректен плазмотро на титанови сплави. Моделите се основават на анализ и числени

решения на уравнението на дифузия. Те са полезни инструменти за оптимизиране на параметрите на повърхностно азотиране на титанови сплави.

## ***2. Научно-приложни приноси:***

2.1 Експериментално е определено, че сигналите чрез които се изследват режимите са стационарни и ергодични. Това дава възможност за точна обработка и интерпретация на измерените величини

2.2 Създадена е принципна схема и е направена декомпозиция на енергията вложена при процеса плазмено прахово напластяване с индиректен плазмотрон.

2.3 Експериментално е определен характерът на изменението на напрежението и тока и влиянието им върху мощността на електрическата дъга на индиректен плазмотрон. При увеличение на работния ток с до 66,67% мощността на дъгата нараства с 86,28%.

2.4 Установена е корелацията между спектъра на измерваните сигнали и периодичността на процесите в плазмотрона. Наблюдава се високочестотна лента на спектъра в областта 2-5 kHz породена от флукуациите и завихрянето на дъгата.

2.5 Експериментално е установено, че стабилността на системата индиректен плазмотрон - източник, е в пряка зависимост от изходното динамично съпротивление. Неговата относителна промяна при различните реализации е в границите на 20-40%. Докато статичното съпротивление се изменя от 70% до 90%.

2.6 Експериментално е определено влиянието на параметрите на режима на плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон върху структурата и свойствата на титанова сплав Ti-6Al-4V.

2.7 Експериментално е установено, че златното покритие предпазва тънкостенните участъци на вътрешнокостната част на импланта и евентуалните нарушавания при целостта на обкръжаващата импланта кост. Това може да доведе до компрометиране процеса на остеоинтеграция. Добавянето на покритие от златно върху определени елементи от импланта е нов и модерен метод в областта на денталната медицина.

## ***3. Приложни приноси:***

3.1 Създаден е нов дизайн на дентален имплантит изработен от титанова сплав Ti-6Al-4V.

3.2. Разработена е технология за нанасяне на антибактериално златно покритие върху дентални импланти изработени от титанова сплав Ti-6Al-4V.



## ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Skulev H., Vasilev R., Study of the relationship between gas flow rate Ar/N<sub>2</sub> and the properties of ni-base plasma sprayed coatings., VIII International Conference, Strategy of Quality in Industry and Education – volume 1, p. 139-142, 8-15 VI 2012г., ISBN 978-966-2637-11-3.
2. Rosen N. Vasilev and Ivaylo Y. Nedelchev, Examples for virtual laboratory exercises by electrical measurements based on NI ELVIS II, ICEST 2010, vol.2, PO XIV.4, p.923-926, 23-26 VI, 2010, Ohrid, Macedonia.
3. Ивайло Неделчев, Христо Скулев, Росен Василев, Влияние на технологичните параметри на режима върху стабилността на работа на плазмотрон с индиректна дъга, Известия на съюза на учените във Варна, 1, 2012г., стр.122-126, ISSN: 1310-5833
4. Ivailo Nedelchev, Hristo Zhivomirov, Rosen Vasilev, Processing of random signals, obtained by investigation of the plazma coating systems with LabView software, Международна научно - техническа конференция "Електроенергетика 2014", Сборник Доклади, стр. 143÷147, ISBN 978-954-20-0497-4, 11-13 септември 2014, Варна, България.
5. Неделчев И., Цаневски А., Василев Р., Едно приложение на платформата NI ELVIS II за визуализация на електрически сигнали, сп. „Машиностроителна техника и технологии“, 2014г., стр.76-81
6. Rosen N. Vasilev, Study the Mechanical Properties of Ti-3Al-2.5V after Surface Plasma Gas Treatmant with Indirect Plasma Torch, Tem Journal, Volume 4, Number 4, 2015, pp. 332-335, [www.temjournal.com](http://www.temjournal.com).
7. Rosen Vasilev, Creating a computer model to determining the cathode node temperature in an indirect plasma torch, сп. „Машиностроителна техника и технологии“, 2015г., стр.3-6, ISSN-1312-0859.
8. Росен Василев, „Оценка ефективността на процеса плазмено-прахово напастяване с помощта на система за сбор на данни“, сп. „Механика на машините“ №116, год.XXIV, кн.3, стр.94÷97, 2015г., ISSN 0861-9727.
9. Rosen Vasilev, Vladimir Chikov, Valentin Gyurov, Ivaylo Nedelchev, „Control end energy efficiency of the system for intelligent measurement, registering and control in electrical substation, Fourteenth International Conference on Electrical Machines, Drives and Power systems, ELMA, Proceedings 126-131p., 1-3. X. 2015,Varna.
10. Росен Василев, „Изследване дизайна на дентални титанови импланти“, Механика на машините №117, год.XXV, кн.1, стр. 134-139, 2017г.
11. Rosen Vasilev, „Investigation of mechanical properties of nickel-base plasma coatings“, Механика на машините №117, год.XXV, кн.1, стр. 140-144, 2017г.

12. Росен Василев, „Свойства на материалите и методи за повърхностно обработване на титан и титанови сплави с приложение в денталната медицина - обзор“, Машиностроителна техника и технологии №1/2016г, стр. 14-33, ISSN 1312-0859.
13. Rosen Vasilev, Hristo Skulev and Tihomir Dovramadjiev, “Optimization of Design Opportunities and transfer of information between Data 3D graphics program Blender and Solidworks CAD System for use in Dental Industry“, 2nd International Scientific Conference “Intelligent information technologies for industry”, September 14-16, 2017, Varna, Bulgaria, Number: 72.