

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Татяна Миткова Мечкарова

„ОПТИМИЗИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ИНДИРЕКТЕН ПЛАЗМОТРОН ЗА ХИМИКО-ТЕРМИЧНА ОБРАБОТКА НА ТИТАНОВА СПЛАВ Ti-6Al-4V”

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и научна
степен „Доктор”

Научен ръководител:

1. доц.д-р инж.Христо Скулев

Рецензенти:

1.....

2.....

ВАРНА 2015

Дисертационният труд е обсъден на КС в катедра „МТМ“ и насочен за защита.

Автор: инж.Татяна Миткова Мечкарова

Заглавие: Оптимизиране и изследване на индиректен плазмотрон за химико-термична обработка на титанова сплав Ti-6Al-4V

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Татяна Миткова Мечкарова

ОПТИМИЗИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ИНДИРЕКТЕН ПЛАЗМОТРОН ЗА
ХИМИКО-ТЕРМИЧНА ОБРАБОТКА НА ТИТАНОВА СПЛАВ ТІ-6АL-4V

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и научна
степен „Доктор“

ВАРНА 2015

Дисертационният труд съдържа 187 страници, включително 71 фигури, 24 таблици, 59 математически зависимости, оформени в увод, 6 части (обзорна с изводи, цели и задачи на дисертацията; разработка на методики за провеждане на научните изследвания, конструиране на нова модификация на индиректен плазмотрон за газово азотиране, експериментално изследване на процеса плазмено азотиране на образци от титанова сплав Ti-6Al-4V, създаване на модел за определяне на качеството на повърхнината получена след плазмено газово азотиране, технологично приложение и внедряване на процеса на плазмено газово азотиране за детайли тип зъбни импланти и сонотроди за ултразвуково резонансно изпитване на умора, общи изводи и заключения и основни приноси), списък с публикациите на автора по темата на дисертационния труд, списък на използваната литература от 178 заглавия, от които 63 на кирилица и 115 на латиница и 2 приложения.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 11.11.2015г. от 13ч. в открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора №262/22.06.2015г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересуващите се във ФД „Докторанти“, стая 318 НУК.

I. Обща характеристика на дисертацията

1. Актуалност на проблема.

Титановите сплави притежават уникална комбинация от добри механични свойства, ниска плътност, добра корозиоустойчивост и биосъвместимост. Това ги прави атрактивни за приложение в различни сфери на промишлеността. Наред с добрите си качества, те се характеризират с лоши трибологични свойства при плъзгащ контакт, висок и нестабилен коефициент на триене, тежко адхезионно износване и силна склонност към задиране.

Повишаване твърдостта на повърхностният слой на титановите сплави чрез химикотермична обработка води до разширяване сферата им на приложение.

Една от възможностите за повишаване на ефективността на процеса плазмено азотиране, е с използване на апаратура комплектувана с индиректен плазмотрон. Тази техника в значителна степен намалява времето на процеса, но дълбочината на азотирания слой е с непостоянен характер.

Създаването на нова модификация на индиректен плазмотрон за газово азотиране на титанова сплав Ti-6Al-4V, би решило проблемите с непостоянния характер на слоя и би намалило времето на протичане на процеса.

2. Цел и задачи на дисертацията.

Основна цел на дисертацията е: Оптимизиране и изследване на индиректен плазмотрон за химико-термична обработка на титанова сплав Ti-6Al-4V.

Така поставената цел се решава чрез съответните конкретни задачи:

1. Разработване и оптимизация на плазмотрон за газово плазмено азотиране. Изготвяне на техническа документация на индиректен плазмотрон.
2. Разработване на симулационен модел на влиянието на температурните полета и флуидните потоци върху ресурса на работа на катодния и анодния възел в индиректен плазмотрон.
3. Установяване влиянието на параметрите на режима на плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон върху структурата и качеството на азотирания слой на титанова сплав Ti-6Al-4V
4. Приложение на плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон за повърхностно модифициране на детайли от Ti-6Al-4V.

3. Обект и място на изследване

Обект на изследване в настоящата работа е „Оптимизиране и изследване на индиректен плазмотрон за химико-термична обработка на титанова сплав Ti-6Al-4V“, в частност методът за плазмено газово азотиране, като се установят технологичните възможности на метода за оптимизиране режимните параметри по експериментален път и създаване на нови методи и средства, обезпечавачи повишаването на качеството и производителността на процеса. Изследванията са проведени в катедра “МТМ” към Технически Университет – Варна.

4. Научна новост на изследването.

Като научна новост може да се определи конструирането на нова модификация на индиректен плазмотрон за газово азотиране, като метод за уякчаваща повърхностна обработка на детайли от титанова сплав Ti-6Al-4V, както и изследване на топлопренасянето и топлините потоци в азотираните образци и в топлинно натоварените възли на плазмотрона, както и изследване на напрегнато и деформирано състояние след такъв вид обработка. Технологичните изследвания също могат да се отнесат към новите резултати, тъй като допринасят за попълване знанията за протичането на процеса плазмено газово азотиране върху титанови сплави и за по-ефективно използване на апаратурата за плазмено газово азотиране.

5. Реализация на резултатите.

Основните практически приноси се отнасят до приложение на методът на плазмено газово азотиране върху титанови образци, усъвършенстване и проверовъчно изпитване на повърхнините. Оптимизирането на режимните параметри на процеса, с оглед използването им при съставяне на конкретни технологии за повърхностно учкчаване на титанови детайли, също е реален практически принос на разработката.

Практическа реализация на метода е разработването на технология за уякчаване на повърхностния слой на дентални импланти от титанова сплав Ti-6Al-4V.

Разработена е технология за подобряване на повърхностния слой на сонотроди за ултразвуково резонансно изпитване на умора.

6. Аprobация на резултатите.

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

- Списание „Машиностроителна техника и технологии“, НТС, ТУ-Варна, 2014, ISSN 1312-0859.

- XXIX Международна конференция “Дефектоскопия ’14”, НИ на НТСМ 2014г., ISSN 1310-3946.

- XVII НТК с международно участие, ЕКОВАРНА 2014, ISBN 954-20-00030.

- Работата е одобрявана периодично и като цяло на заседания на катедра „МТМ“ при МТФ на ТУ-Варна.

7. Публикации по дисертацията.

Основните етапи от разработването на дисертационния труд са отразени в 7 публикации, списък на които е приложен в края на автореферата.

II. Кратко изложение на основните резултати от дисертацията.

ГЛАВА 1. СЪСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИЕТО НА МЕТОДИТЕ ЗА ГАЗОВО АЗОТИРАНЕ НА МЕТАЛИТЕ

В прегледа на литературата са разгледани, анализирани и съпоставени различни методи за газово азотиране на металите. Анализирани са също апаратурите и плазмотроните за реализация на плазмените методи за повърхностно уякчаване. Отделено е по-голямо внимание на изследвания метод за плазмено

газово азотиране с апаратура за плазмено напластяване окомплектована с индиректен плазмотрон и възможностите за приложението му върху различни детайли от титанова сплав Ti-6Al-4V. В края на главата са направени изводи от литературното проучване и са формулирани целта и задачите на дисертационната работа.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА НА МЕТОДИКИ ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА НАУЧНИТЕ ИЗСЛЕДВАНИЯ

В тази глава е направен е преглед на методиките за настоящите изследвания. За целта са използвани методите за пресмятане на работните параметри, геометричните размери, системата за охлаждане и ресурса на работа на индиректен плазмотрон за химико-термично азотиране, измерване на отклонението на формата на равнинни повърхнини, измерване на грапавостта след плазмено газово азотиране, методите за термичен анализ и методики за определяне на повърхностна твърдост и микротвърдост, както и макро и микроструктурен анализ.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТВАНЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НА ПЛАЗМОТРОН ЗА ГАЗОВО ПЛАЗМЕНО АЗОТИРАНЕ. ИЗГОТВЯНЕ НА ТЕХНИЧЕСКА ДОКУМЕНТАЦИЯ НА ПЛАЗМОТРОН PTN 50

3.1. Пресмятане на работните параметри, геометричните размери, системата за охлаждане на индиректен плазмотрон за PTN50 за газово азотиране на титан и титанови сплави.

Създаването на нова модификация на индиректен плазмотрон за повърхностно газово обработване (азотиране) - PTN50 с един кръг на охлаждане (фиг.3.1) се породило от необходимостта за постоянство в характера на крупномащабните шунтирания в плазмотрона, което да осигури постоянен по вид и дълбочината на повърхностното азотиране. Като първа стъпка в това направление бе да се създаде методика за математическо моделиране на процесите в плазмотрон с индиректна дъга.

С методиката се определят следните параметри: работното значение на тока I и напрежението на дъгата U , топлинния коефициент на полезно действие η , диаметъра на отвора за подаване на работния газ, геометричните размери на разрядния канал и катода, обезпечаващи необходимия ресурс на работа, разхода на вода за охлаждане на възлите на плазмотрона.

Входни данни:

- Вид на плазмообразуващия газ; Ar/N₂;
- Максимален разход на плазмообразуващ газ –
 $G = 50 \text{ slpm} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$.
- начална температура на Ar/N₂ $T_n = 300 \text{ K}, (26,85^\circ\text{C})$
- крайна температура на Ar/N₂ $T_k = 2600 \text{ K}, (2326,9^\circ\text{C})$
- налягане на работния газ на изхода от плазмотрона $p = 105 \text{ Pa}$,
- катод – меден с волфрамова вложка,
- анод – меден цилиндричен степенчат
- стабилизация на дъгата- линейна
- без външна магнитна стабилизация на дъгата
- ресурс на работа на плазмотрона – най-малко 50 часа.
- работи се с постоянен ток на права полярност

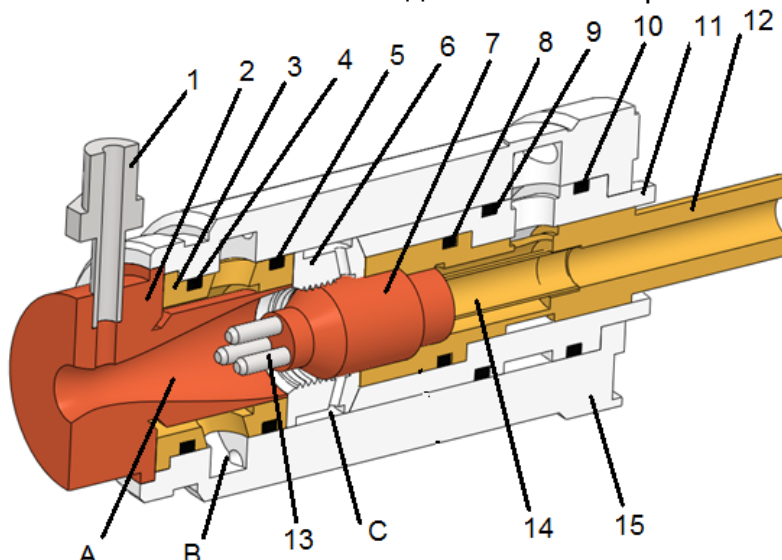
$-V\phi/Vz = \text{const}$, където $V\phi$ – тангенциална съставляваща на скоростта на газа; Vz – осева съставляваща.

-плътността на топлинния поток падащ върху повърхността на катода е еднаква по цялото му напречно сечение.

-плътността на тока е еднаква по напречното сечение на катода.

-процесът е стационарен. Фактически той е квазистационарен.

На фиг. 3.1 е показана схема на изследвания плазмотрон.



Фиг.3.1. Плазмотрон РТN50 с три електрода:

- 1-входящ щуцер; 2-дюза за азотиране (анод); 3-втулка за въвеждане и разпределяне на охлаждащата вода; 4, 5, 8, 9 и 10-уплътнителни пръстени;
6-газоразпределителна втулка от тефлон;7- меден катододържач;
11- електроизолационна втулка от полиамид; 12-вътрешен корпус от месинг;
13- три волфрамови катода; 14-тръба за подвеждане на охлаждащата вода;
15-външен корпус от месинг; А- йонизационна камера; В- успокоителна камера;
С- компенсационна камера

Плазмотрона се състои от външен корпус 15 към който е монтирана дюзата за азотиране /анод/ 2 и вътрешен корпус 12, към който е монтиран катододържача 7. Катододържача е конструиран като централно тяло съставено от меден водоохлаждаем корпус и волфрамови електроди 13. Вътрешният корпус е електроизолиран спрямо външния посредством втулка 11. Газоразпределителната втулка 6 чрез компенсационната си камера С осигурява постоянно по налягане и дебит подаване на плазмообразуващ газ в йонизационната камера А. Това осигурява стабилност на горене на дъгата. Дюзата анод е конструирана като централно тяло и е изработена от електролитна мед. Тя осигурява стабилна дължина на дъгата и осево изтичане на плазмообразуващия газ, като дава направление на плазмената струя към мястото на обработване с достатъчно количество атомен /N/ и йонизиран /N+/ азот.

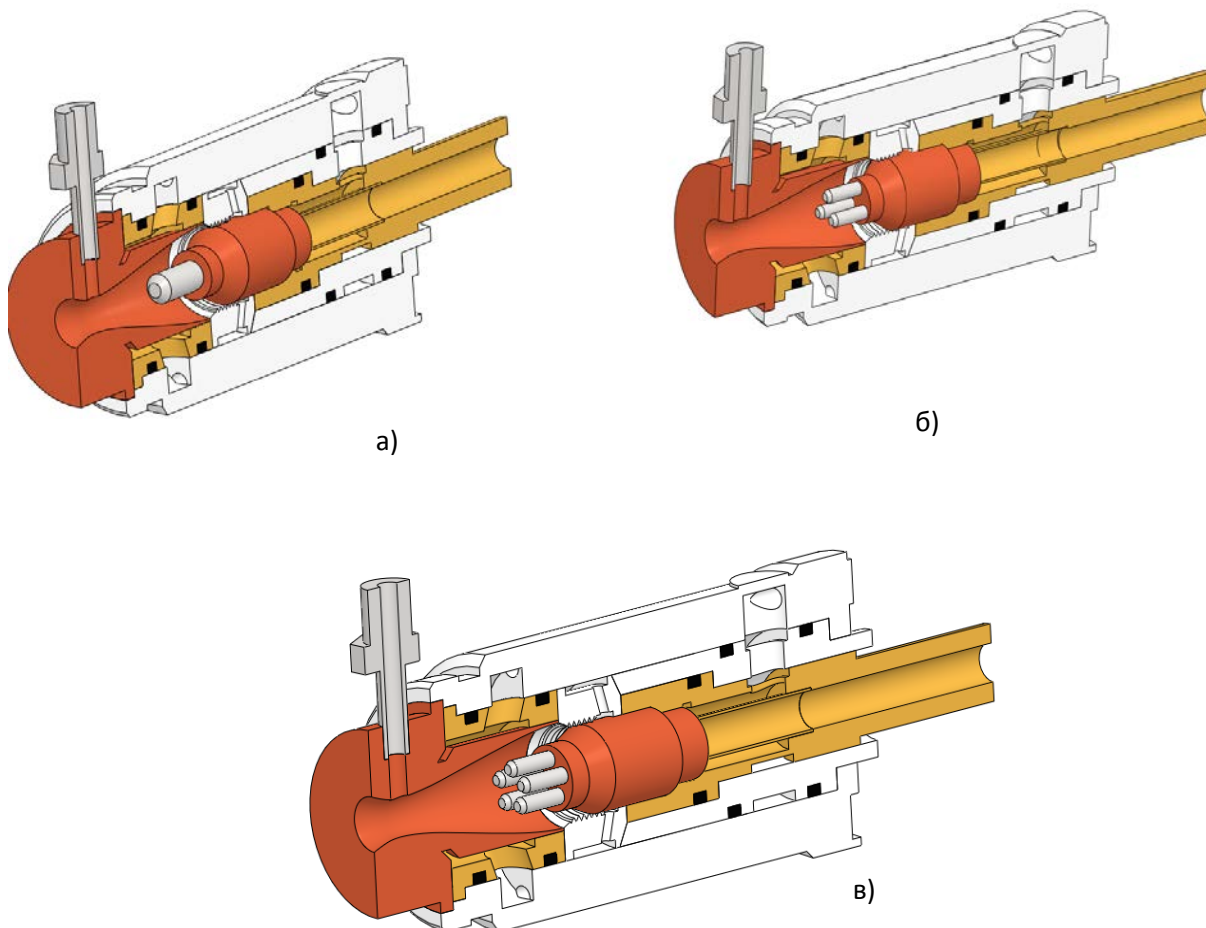
3.2. Разработване на симулационен модел на влиянието на температурните полета върху плазмотрон за азотиране.

Целта е да се създаде математичен модел, описващ температурното натоварване в основните възли на индиректен плазмотрон при прилагането на плазмената технология. Анализирани са експерименталните резултати от проведените експерименти от първи етап на разработване на проекта свързан със

създаване и изследване на градиентно структурирани нано и микро слоеве върху дентални импланти от титанова сплав Ti-6Al-4V.

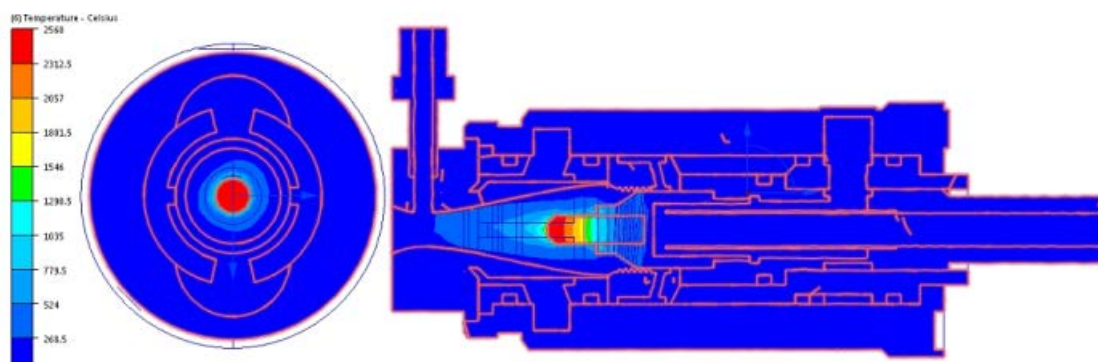
В тази връзка за да се осигури добра база за сравнение на получените резултати от компютърното моделиране са разработени три геометрични разновидности на един от най-тежко натоварените възли-катодния:-с 1, 3 и 5 волфрамови електрода, фиг.3.5.

След въвеждане на изходните данни чрез програма Autodesk Simulation CFD се направи термичен анализ (фиг. 3.6) за въздействието на температурата върху основните възли на плазмотрона.

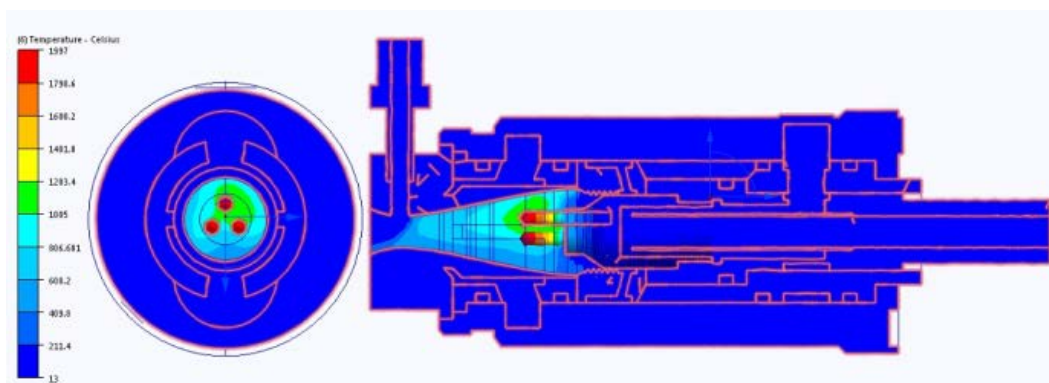


Фиг.3.5. Компютърни модели на плазмотрон с различен брой волфрамови електрода: а) с един електрод; б) с три електрода; в) с пет електрода

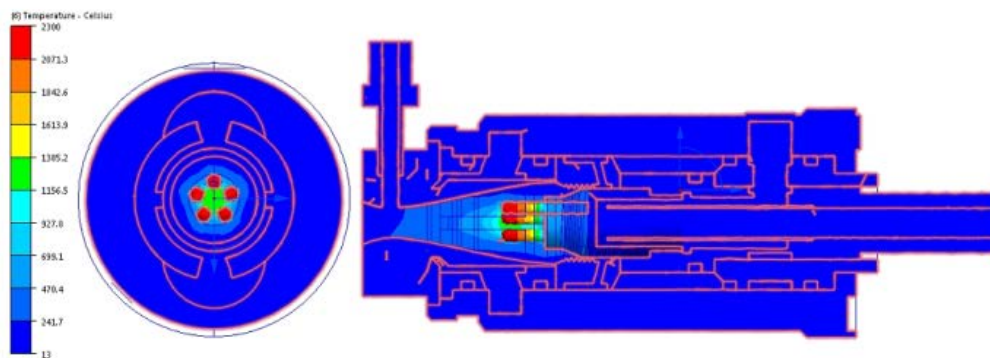
Целта е осъществяване на сравнителен анализ между трите компютърни модела (фиг. 3.6), с 1, 3 или 5 волфрамови електрода и определяне на този с най-ниско температурно натоварване предполагащо и най-дълъг ресурс на работа на основните възли.



а)



б)

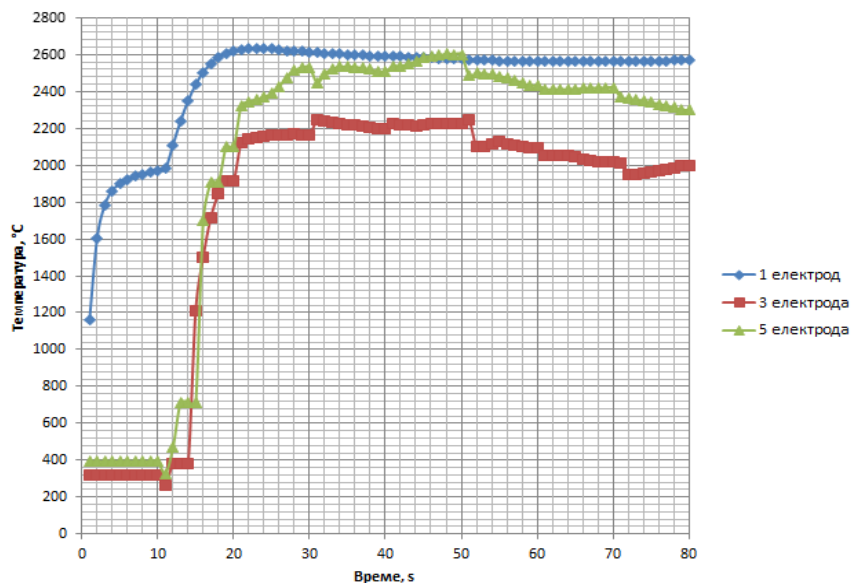


в)

Фиг.3.6. Анимирано представяне разпределението на температурата от програмен продукт Autodesk Simulation CFD при $t=80s$ работа на плазмотрона: а) с 1 волфрамов електрод, б) с 3 волфрамови електрода; в) с 5 волфрамови електрода

За онагледяване на резултатите от извършения компютърен анализ на фиг.3.7, е направено и графичното им представяне, като на ординатната ос е разпределението на температурата в $^{\circ}C$, а по абцисната ос – времето на температурно въздействие в s.

От графиката се вижда, че с най-ниско температурно натоварване е конструкцията на плазмотрон с три електрода. Максималната отчетена температура е $2221^{\circ}C$ достигната за време 35s, а до 80s, процесът става стабилен и температурата има постоянна характер и е около $2000^{\circ}C$.

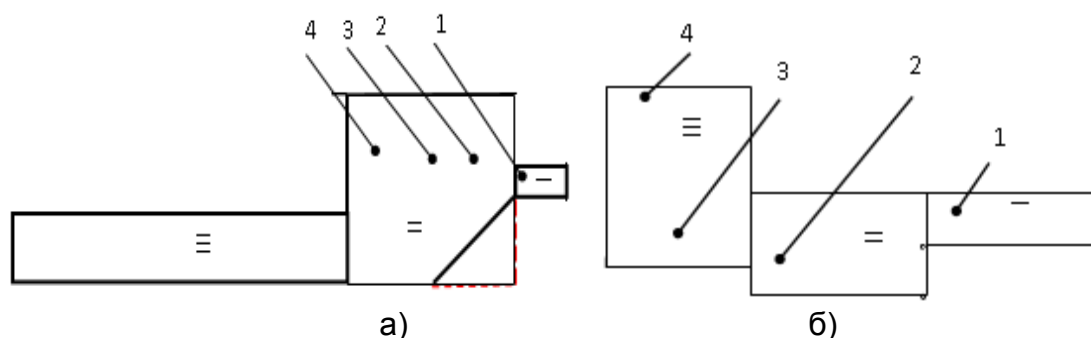


Фиг.3.7. Компютърно моделирани криви с разпределението на температурата за трите конструкции плазмотрони при време на температурно въздействие 80s: а) с един електрод; б) с три електрода; в) с пет електрода

За проверка адекватността на модела от численото моделиране на температурното поле в катодния възел е конструиран и изработен катод с 3 волфрамови електрода. Проведен е експеримент с технологичен режим, съответстващ на изчислителния.

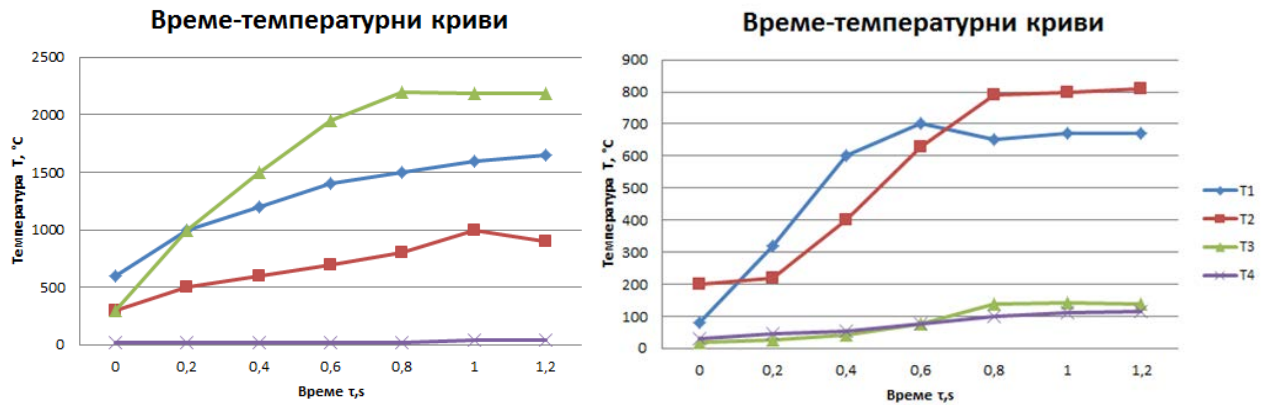
По схемата показана на фиг.3.8, се монтират термодвойки от вида, съответно от 1 до 3 “волфрам - рений” тип С (от 0 до 2320°C) и 4 “хромел- аломел” Тип К (-200 до 1200°C);

При начална температура 20°C, температурното поле в четирите характерни точки при катода се стабилизира от 40 до 60s, а при анода се стабилизира след време 55±60s.



Фиг.3.8. Разположение на термодвойките:
а) в катода; б) в анода

Получените експериментални резултати за температурното поле в четирите характерни точки от катода и анода са на фиг.3.9 и 3.10.



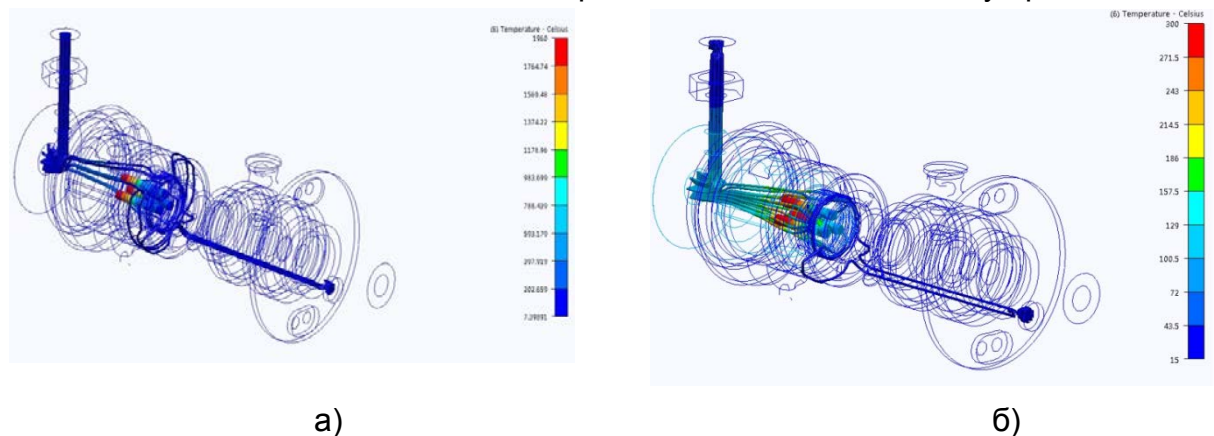
Фиг.3.9. Време-температурни криви от термодвойките в катода и анода

Получените резултати (фиг.3.7) показват, че формата и размерите на електродъговата камера и канала на дюзата също оказват съществено влияние за стабилността на работа на индиректния плазмотрон. За да се осъществи добра стабилизация на дъгата чрез стените на дюзата е необходимо диаметъра на дюзата да е по-малък от електропроводящия диаметър на дъгата.

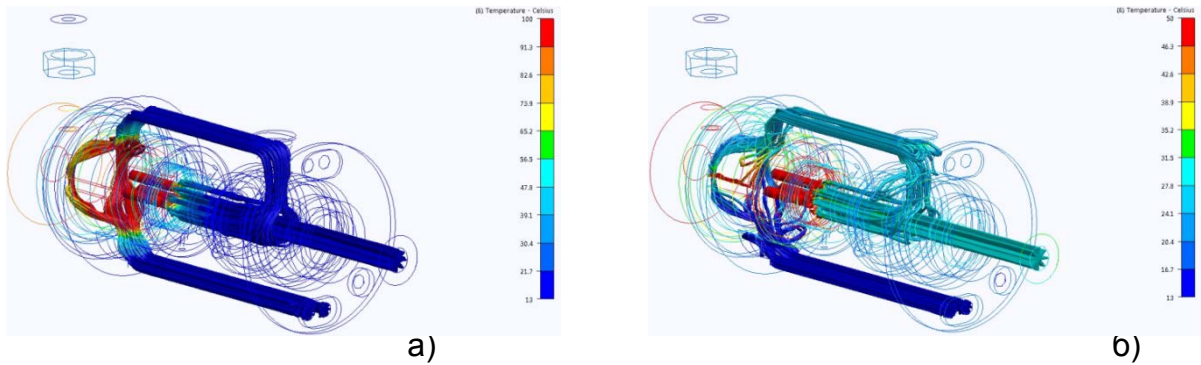
3.3. Разработване на симулационен модел за влиянието на флуидните потоци върху ресурсните изпитвания на катодния и анодния възел в плазмотрон PTN50.

На база компютърното моделиране и ресурсните изпитвания на катодния и анодния възел на плазмотрон PTN50 е разработена методика създаваща симулационен модел, отчитащ влиянието на флуидните потоци при работа на плазмотрона.

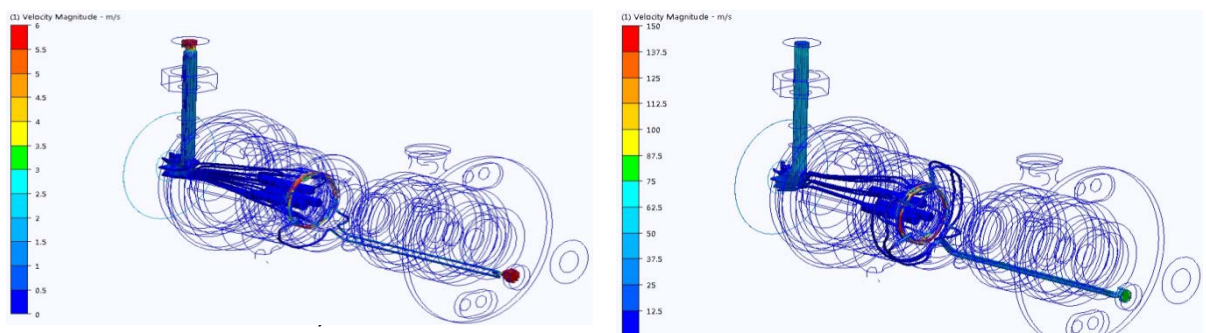
На фиг.3.11 и фиг.3.12 е показано анимираното изображение на температурата, а на фиг.3.13 и фиг.3.14 е показана скоростта, на плазмообразуващия газ и охлаждащата вода в модела след завършване на аналитичното му пресмятане.



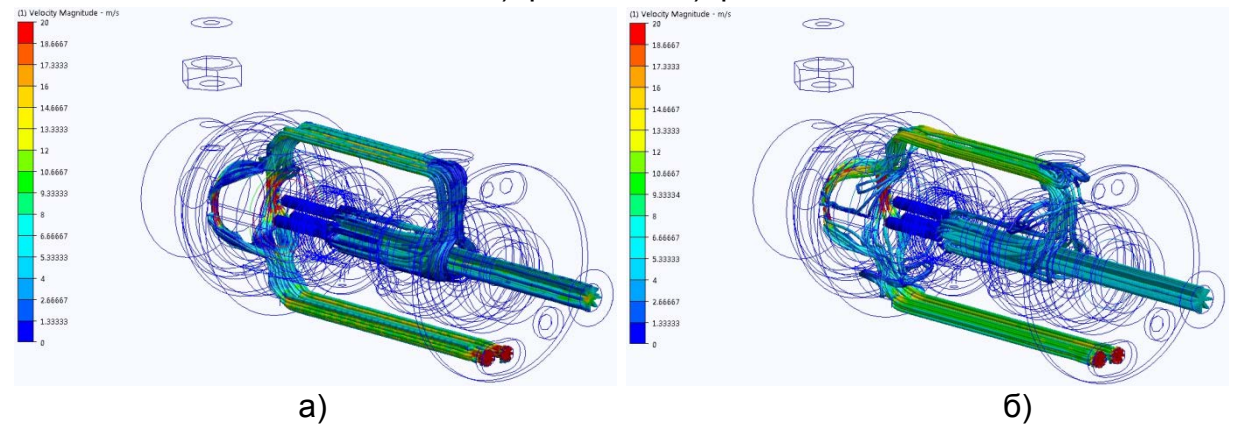
Фиг.3.11. Симулационен анализ на температурата на плазмообразуващия газ в горелка с три електрода от програмен продукт Autodesk Simulation CFD: а)при $\tau=10s$; б)при $\tau=80s$



Фиг.3.12. Симулационен анализ на температурата на охлаждащата вода в горелка с три електрода от програмнен продукт Autodesk Simulation CFD:
 а)при $t=10s$; б)при $t=80s$



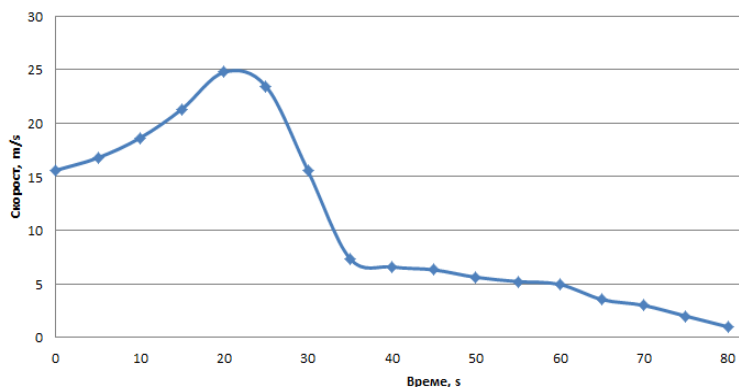
Фиг.3.13. Симулационен анализ на скоростта на плазмобразуващия газ в горелка с три електрода от програмнен продукт Autodesk Simulation CFD:
 а)при $t=10s$; б)при $t=80s$



Фиг.3.14. Симулационен анализ на скоростта на охлаждащата вода в горелка с три електрода от програмнен продукт Autodesk Simulation CFD:
 а)при $t=10s$; б)при $t=80s$

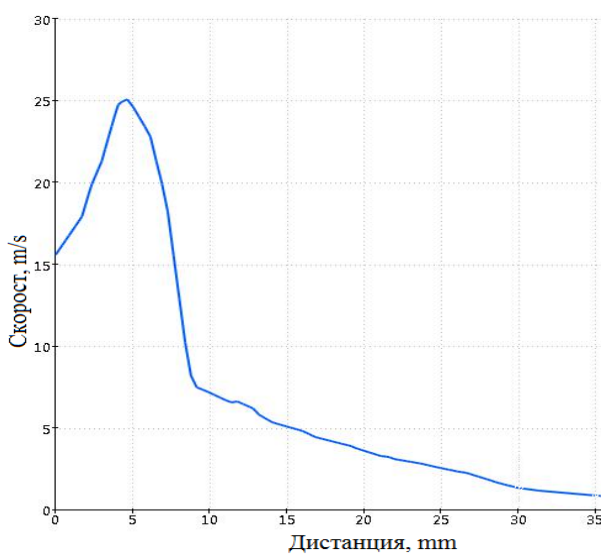
Получените резултати от стимулационния анализ показват, че равновесно състояние по отношение на температурата, плазмотрона достига на 78s.

Резултати от разпределението на температурите във времето и изменението на скоростта на движение на флуидите в плазмотрона, програмно отчетени от чрез методиката, са представени на фиг.3.15. Максималната скорост 25,0887m/s, е отчетена в 22s от времето на въздействие,като процесът става стабилен за периода от 70 до 80s, което е благоприятно за по дългосрочната работа на електродите.



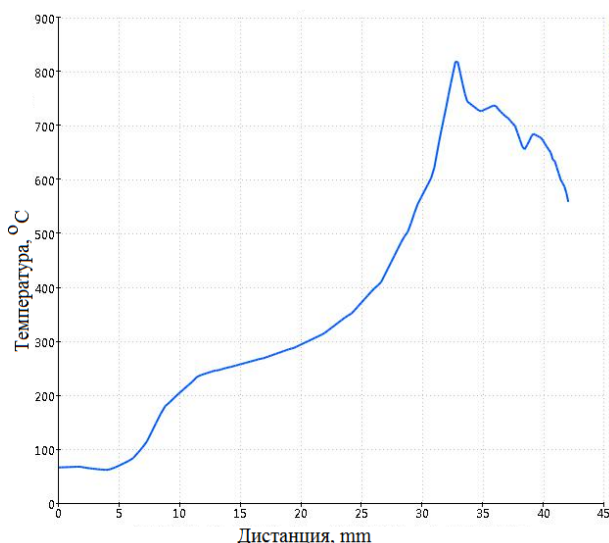
Фиг.3.15. Компютърно моделирана крива с разпределението на скоростта на движение на флуидните потоци при време на температурно въздействие 80s

Резултатите от компютърното моделиране показаха, че най- високи стойности за скоростта на движение на флуидните потоци, в дюзата на плазмотрона, се получават на 5mm от началото и, фиг.3.16.



Фиг.3.16. Разпределението на скоростта на движение на флуидните потоци в дълбочина на дюзата

Отчетената температура в пристенната зона на дюзата-анод, съгласно симулационния модел е показана на фиг.3.17. Максималната стойност на температурата е 820°C, която е много по ниска от тази на топене на основния материал на дюзата -мед (1083°C).



Фиг.3.17. Разпределение на температурата на флуидните потоци в дълбочина на дюзата

3.4. Ресурсни изпитания на катодния и анодния възел на плазмотрон PTN50.

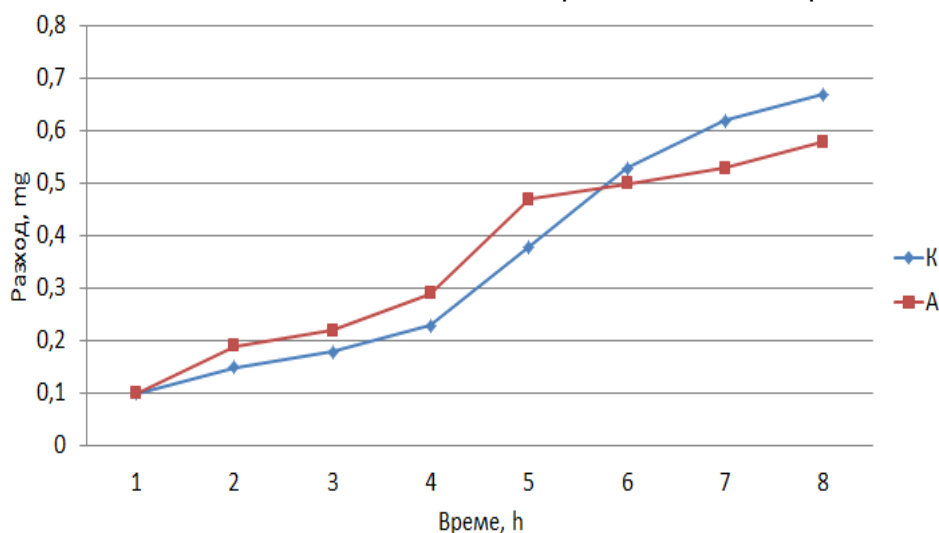
За изследване ресурса на анодния и катодния възел са проведени 8 часови изпитания с новосъздадения катоден възел. Изпитанията бяха проведени при режим съответстващ на този заложен в методиката:

-сила на тока - $I = 500\text{A}$;

-разход на плазмообразуващ газ /Ar/N₂/ 30slpm.

Получените резултати за разхода на електроден материал за анодния и катодния възели са представени на фиг.3.18.

На всеки отработен час, плазмотрона е разглобяван и са провеждани визуален контрол и тегловни измервания на катодния и аноден възел. Показаните резултати са усреднените стойности получени от 5 контролни измервания във всяка точка. Тегловното износване на анода и катода е минимално и се движи в рамките до 1mg. Няма видимо износване по работните части на катодите и медната дюза анод. Минималните констатирани загуби, вероятно са в резултат на първоначалното стартиращо запалване на дъгата след всяко спиране на плазмотрона.



Фиг.3.18. Резултати от тегловните измервания на анодния и катодния възли

3.5. Изводи.

Въз основа на направения анализ на получените резултати и построените диаграми можем да направим следните изводи:

1. На база на методика за пресмятане на работните параметри, геометричните размери, системата за охлаждане на индиректен плазмотрон за газово азотиране на титан и титанови сплави е изготвена конструкторска документация на нова модификация на плазмотрон PTN50.

2. Изчислени са работните параметри и геометричните размери на плазмотрона и са моделирани в програмния продукт SolidWorks три работни конструкции на плазмотрона за индиректно газово азотиране (с един, три и пет отделни волфрамови катода с общо охлаждане).

3. Установено е, че индиректния плазмотрон с три отделни волфрамови електрода показва най-добри ресурсни параметри при следните режими: $I=500\text{A}$; $P=35\text{kW}$; $Q_{\text{Ar/N}_2}= 30\text{slpm}$.

4. Получени са резултати за тегловният разход на катодния (катододържач с три електрода) и аноден възли на модифициран плазмотрон PTN50, от които съдим

че той притежава необходимия потенциал за запазване на основните параметри на режима по-време на работа в продължение на 8 часа.

5. Установено е, че параметрите на температурата остават постоянни след 80s на температурно въздействие от модифицирания индиректен плазмотрон, PTN50.

6. Установено е, че модела е адекватен и може да послужи за бъдещи разработки тъй като експериментално получените данни за влиянието на температурните полета върху плазмотрон за азотиране и компютърно симулираните данни при еднакво зададени работни условия е в порядъка 2%.

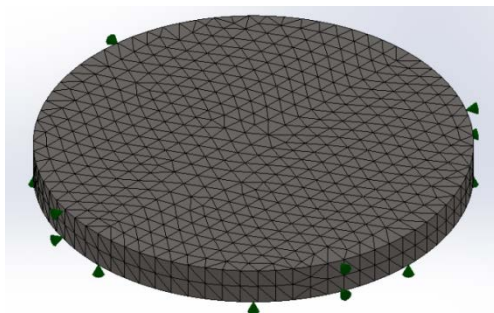
7. Отчетената максимална температура в пристенната зона на дюзата е 820°C, а скоростта на изтичане на охлаждащият флуид е 20m/s, при запазване температурата му от 27°C, което не предполага създаването на парогазов мехур в охлаждащите възли.

8. Разработен е компютърно- симулационен модел за влиянието на флуидните потоци върху ресурсните изпитвания на катодния и анодния възел в плазмотрон PTN50, който се разминава от експерименталните резултати с 1,5%.

ГЛАВА 4. СЪЗДАВАНЕ НА МЕТОДИКИ ЗА КОМПЮТЪРНО МОДЕЛИРАНЕ НА ТОПЛОПРЕНАСЯНЕТО И НАПРЕГНАТО- ДЕФОРМАЦИОННОТО СЪСТОЯНИЕ НА ОБРАЗЦИ ОТ Ti-6Al-4V.

4.1. Създаване на методика за топлопренасянето и топлинните потоци на плазмено азотирани образци от Ti – 6Al – 4V.

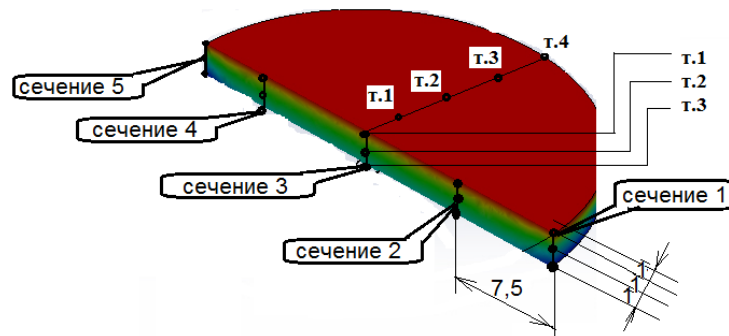
След моделирането в SolidWorks на триизмерен образец чрез команди circle, extruded boss/base, се избра материал от библиотеката на програмата- Ti-6Al-4V, приложи се дискретизация на модела чрез метод на крайните елементи (команда create mesh), като полученият брой елементи е 7994, а възлите са 12963 (фиг.4.1) [24,34,45,47,49,69].



Фиг.4.1. Мрежа (Mesh) на обекта по метода на крайните елементи

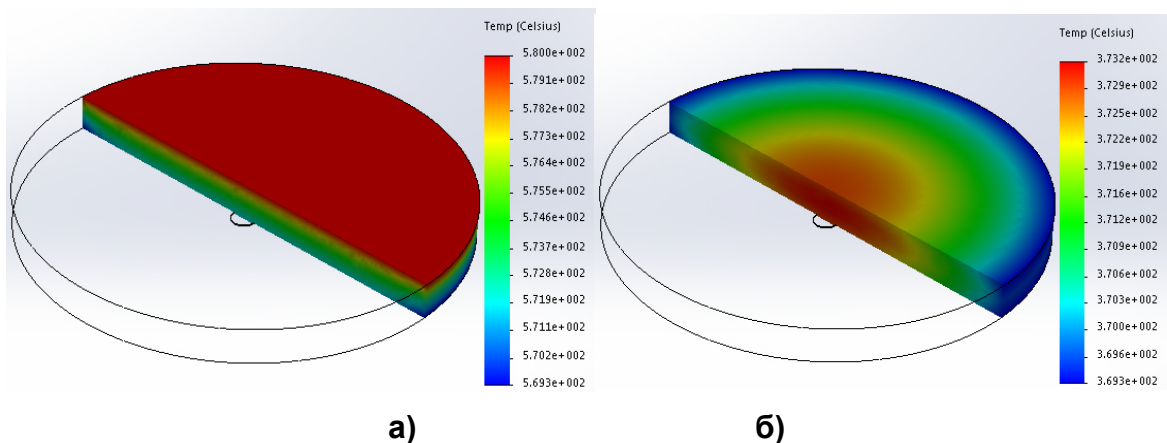
За да симулираме разпределението на температурата в модела подложен на въздействието на високотемпературен източник на топлина, използваме модул Simulation -Thermal Analysis на програмата [45,47,49].

За да се извърши термичния анализ на симулирания обект, програмно се въведеха същия брой температурни сензора (термодвойки) за съответните сечения като на показаните на фиг.4.2.



Фиг.4.2. Схема с разположение на термодвойките

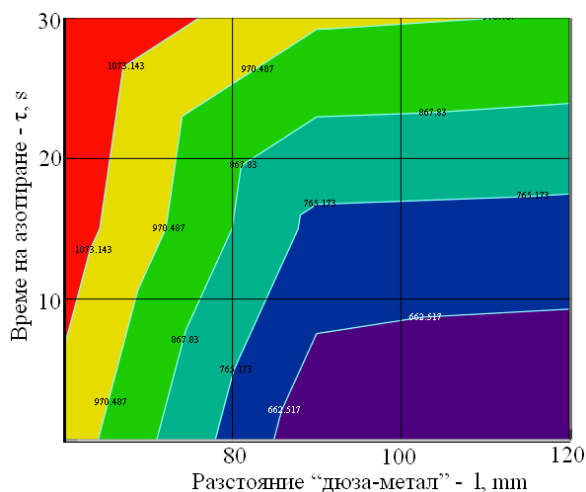
След направения термичен анализ са изведени 9 резултата (анализи) за изследваните зони на високотемпературно въздействие, всяка с период от 10, 20 и 30 секунди при различно разстояние - 80mm, 100mm и 120mm. На фиг.П-2.1 е показано анимираното изображение на модела след завършване на аналитичното му пресмятане от програмния продукт, а резултатите от разпределението на температурите във времето с добавените 3 температурни сензора, са представени в графичен вид фиг. П2.2-П2.4.



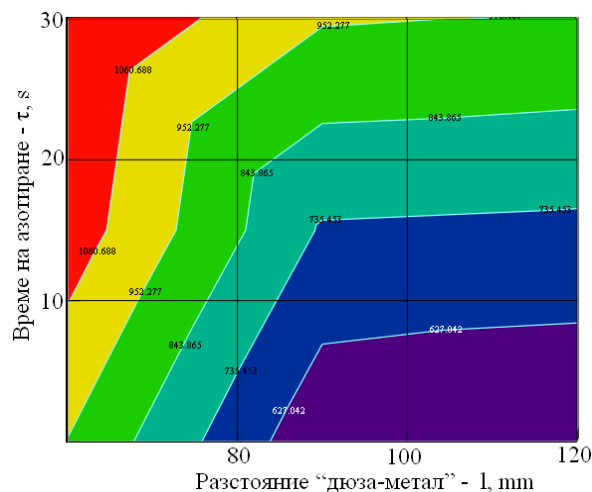
Фиг.П2.1. Анимирано представяне на симулациония анализ от програмен продукт SolidWorks: а) $t=10s$ при $l=80mm$; б) охлаждане до $t=210s$;

За онагледяване на резултатите от извършения компютърен анализ на фиг. 4.3 е направено и графичното им представяне, като на ординатната ос е времето на температурно въздействие в s, а по абсцисната ос – разстоянието между дюзата на плазмотрона и модела в mm.

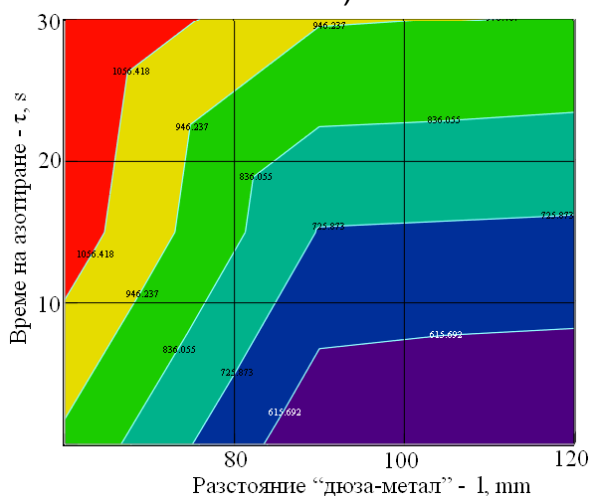
Показаните резултати от разпределението на топлинния поток са при отстояние на горелката от детайла на разстояние $l=80mm$, 100mm и 120mm при 10, 20 и 30 секунди на температурно въздействие. Анализът на резултатите показва че, с увеличаване времето на въздействие /нагреване/ се получава намаляване на скоростта на разпределение на топлинния поток.



а)



б)



в)

Фиг.4.3. Компютърно моделирани криви с разпределението на температурата за три избрани сензора при различно време на температурно въздействие и различно разстояние между дюзата и детайла:
 а)термодвойка 1; б)термодвойка 2;
 в)термодвойка 3

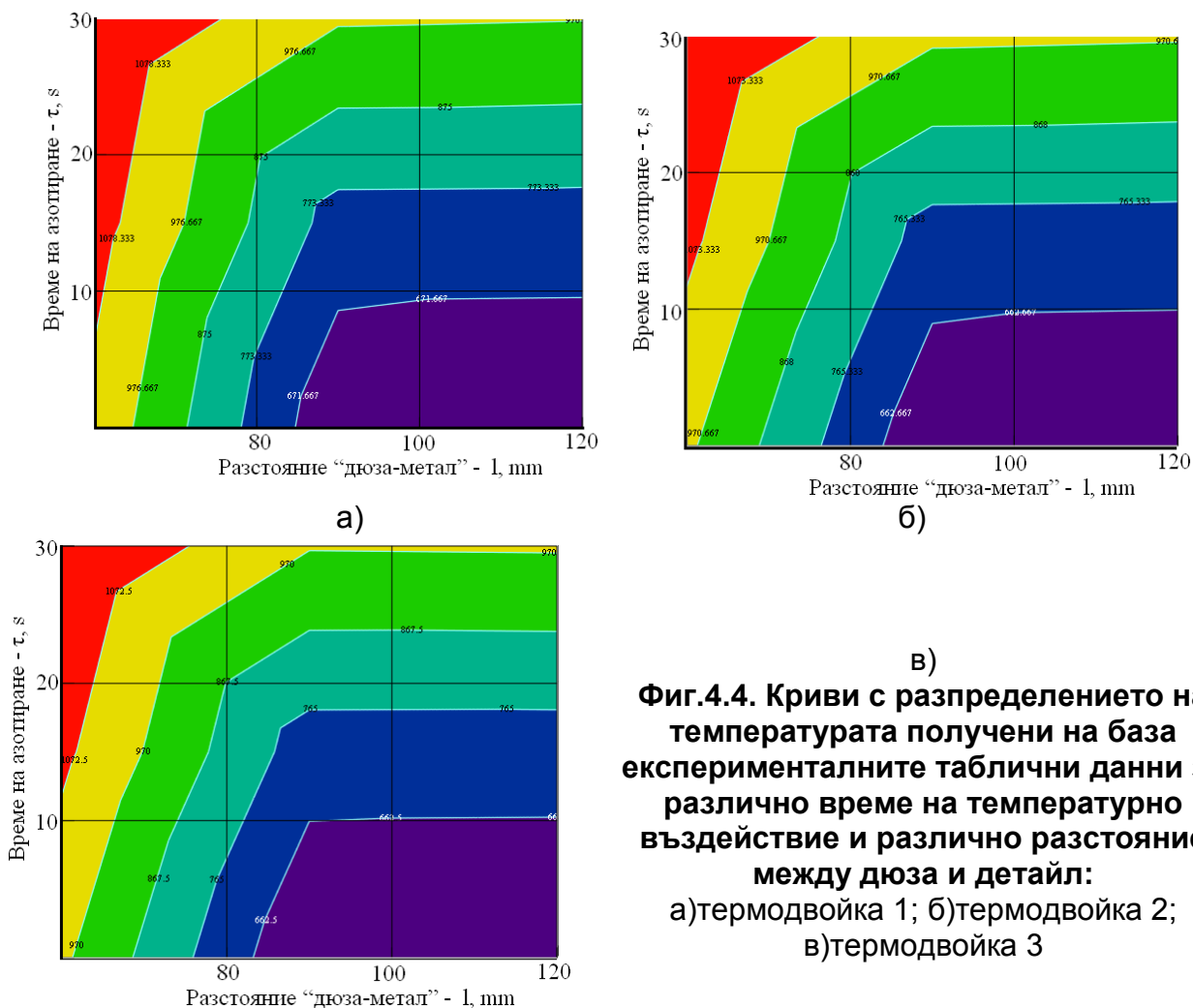
За проверка адекватността на компютърния модел е проведен експеримент със същия технологичен режим.

На образци от титанова сплав Ti-6Al-4V се залагат термодвойки "хромел-аломел" тип К с обхват от -200°C до $+1200^{\circ}\text{C}$ по посочената методика.

Целта на изследването е да се определи средно-масовата температура в образеца за време на въздействие 10s, 20s и 30s при мощност на плазмотрона 25kW и разстояние до обекта 80,100 и 120mm при еднакви други режимни и технологични параметри. Получените резултати ще бъдат заложили като сравнителни такива в модела, като параметър - "температура в зоната на въздействие".

Заложени са 19 броя термодвойки от които 15 основни разположени в три реда и 4 контролни разположени на нивото на първия ред. Първия ред се намира на 1mm от повърхността на образеца. Вторият ред отстои от първия на 1mm, а третия ред отстои на 1mm от втория. Сечение 3 се намира в средата на образеца. Сечения 1,2,4 и 5 са на равни разстояния помежду си - 7,5mm съгласно фиг.4.2.

На фиг.4.4 а), б) и в), са показани криви с разпределението на температурата получени на база експерименталните таблични данни за различно време на температурно въздействие и различно разстояние между дюзата и детайла, отчетени от трите термодвойки.



Фиг.4.4. Криви с разпределението на температурата получени на база експерименталните таблични данни за различно време на температурно въздействие и различно разстояние между дюза и детайл:
а)термодвойка 1; б)термодвойка 2;
в)термодвойка 3

4.2. Изследване процесите на напрегнатото и деформираното състояние на плазмено азотирани образци от Ti – 6Al – 4V.

Задачата поставена за решаване е, да се изследва и установи, какви са крайните остатъчни напрежения формирани след повърхностна химикотермична обработка с индиректен плазмотрон на детайли от титан и титанови сплави. Изследването е свързано още и с определяне на опасността от появата на пукнатини или разрушаване след повърхностна обработка с индиректен плазмотрон на детайли от титан и титанови сплави.

Решаването на поставената задача чрез моделиране на процесите на напрегнатото и деформирано състояние след газоплазмено азотиране на образци от Ti-6Al-4V с помощта на SolidWorks, ще определи какви са крайните остатъчни напрежения формирани след повърхностна химикотермична обработка с индиректен плазмотрон.

Получаването на точното решение на задачата за определяне на напреженията и деформациите при повърхностно газоплазмено азотиране е свързано с определяне влиянието на: времето на въздействие и температурата на повърхностните слоеве в условия, при които в широки граници се променят толофизическите и физикомеханичните качества на метала. Решаването на тази задача в настоящия момент се осъществява на базата на опростяване на свойствата на метала, условията за топлообмен между източника на топлина,

началните и гранични условия и геометричната форма на обработваните детайли [6,7,8,9,10].

За определянето на напреженията и деформациите, породени от температурното въздействие, с помощта на компютърно симулационен модел в средата на SolidWorks се изисква предварително извършване на термичен анализ на разглеждания обект от началото на нагряване до пълното му охлаждане, разгледан в т.4.1. Получените резултати за температурното поле служат като изходни данни за статичния анализ на напрегнатото и деформираното състояние в посочения интервал.

За да симулираме статичните анализи в модела, на високотемпературен източник на топлина, използваме модул Simulation/Static на програмата [80,91,99,106,135].

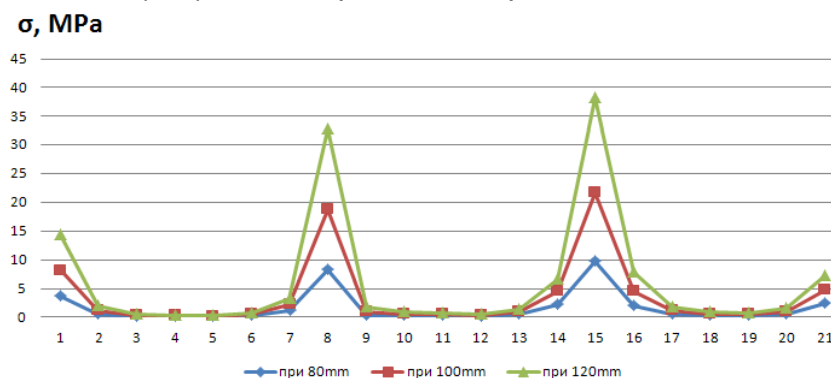
Във него се въвеждат началните гранични условия на процеса повърхностно газоплазмено азотиране:

- начална температура на моделирания образец - 22°C;
- температура в зоната на азотиране –е определена от мощността на топлинния източник- 25(kW);
- вида на топлообмена - от посочените повърхности на детайла дефинираме конвективен топлообмен с коефициент 15W/(m²·K) при нагряване и 8W/(m²·K) при охлаждане.

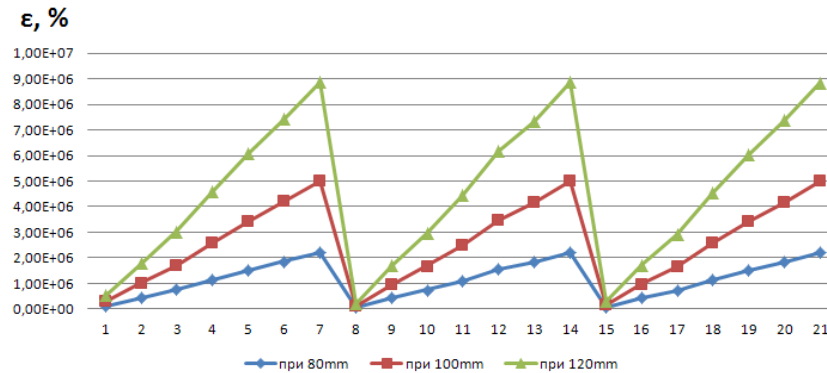
За да се симулира процеса на повърхностно газоплазмено азотиране, изследваната област на получения повърхностен слой с време на въздействие на процеса 10, 20 и 30s. В случая се извършват 6 на брой анализи за процеса на повърхностно газоплазмено азотиране. Не се дефинира начална температура за всеки следващ анализ, т.к. се използват резултатите от предходния като начални условия. Определят се контактите между основния материал (образеца) и керамична цанга за закрепване, като се спазва изискването - да са плътно слепени един към друг, използвайки функцията за контакт - тип Bonded.

На фиг.4.5 и фиг.4.6 графично са представени резултати от статичния анализ за възникващите напрежения и деформации чрез програмния продукт за различно отстояние на горелката от образца.

На фиг.П2.6-П2.8 е показан статичен анализ (Simulation/Static) и извеждане на резултатите за посочените времеви интервали на образци от Ti-6Al-4V при повърхностно газоплазмено азотиране с индиректен плазмотрон, на които температурата в зоната на азотиране се определя от въведената мощност на топлинния източник- 25(kW), след определено време на въздействие.



Фиг.4.5. Резултати от статичен анализ на напреженията



Фиг.4.6. Резултати от статичен анализ на деформациите

На диаграмата на фиг.4.5, се вижда че напреженията отчетени с датчиците поставени на повърхността и в дълбочина на образеца и при трите изследвани температури на азотиране са около 40MPa, т.е. под допустимата граница на материала 172,34MPa.

В процеса на нагряване най-големите напрежения са групирани в централната зоната на образеца, което се обяснява с концентрацията на топлинно въздействие дължащо се на гаусовото разпределение на температурите в плазмената струя.

Показаните резултати от симулационния анализ напълно кореспондират с теоретичните постановки относно появата и разпределението на термичните напрежения при повърхностно газоплазмено азотиране с индиректен плазмотрон на разгледания модел.

Чрез дадените на фигурите разпределения се установят максималните стойности на напреженията и деформациите във всички точки от обема на обекта. След симулиране на процес газоплазмено азотиране може да се оцени големината на остатъчните напрежения и да се предвиди влиянието им върху работните напрежения на конструкцията.

4.3. Изводи.

Обобщавайки резултатите се вижда, че:

1. Демонстрирания метод за 3D моделиране на процесите на топлопренасяне и оценка на напрегнатото състояние след газоплазмено азотиране с индиректен плазмотрон на образци от Ti-6Al-4V има универсален характер. Използването на продукт като SolidWorks дава възможност за експериментиране на различни повърхностни технологии, като се варира с изходните параметри на режимите или използване на различни материали.

2. Създадена е методика за изследване на топлопренасянето и топлинните потоци на плазмено азотирани образци от Ti – 6Al – 4V.

3. Създадена е методика за изследване процесите на напрегнатото и деформираното състояние на плазмено азотирани образци от Ti– 6Al– 4V.

4. Установено е, че методиките са адекватни, като е определено разминаване между теоретичните и експериментални данни между 1-3%.

ГЛАВА V. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ ЕФЕКТИВНОСТТА НА КОМПЛЕКТУВАН С КАТОД С ТРИ ЕЛЕКТРОДА.

5.1. Експериментално- статистическо изследване на оптималните режими на работа при повърхностно газоплазмено азотиране на образци от Ti – 6Al – 4V, върху изменението на микротвърдостта по дълбочина на уякчената зона.

Тази част от изследванията е извършена в съответствие с т.2.11 “Разработване на методика за експериментално-статистическо изследване на оптималните режими на работа при повърхностно газоплазмено азотиране на образци от Ti – 6Al – 4V ”.

Повърхностно газоплазмено азотирани са 35 образеца: 31 образеца съгласно избрания план и 4 образеца за проверка повторемостта на резултатите. Качеството на образците след повърхностно газоплазмено азотиране е оценено количествено с бална оценка от (0 до 1).

С помощта на програмата:”Mathcad 2001” се обработват данните от плана и се изчислява регресионното уравнение отразяващи изменението на микротвърдостта на съответните образци във функция на технологичните фактори при повърхностно газоплазмено азотиране.

Замествайки стойностите им в уравнение (2.58), получаваме уравнението на регресия във вида:

$$Y (X_1, X_2, X_3, X_4) = 529.140700 + 164.596500 * X_1 + 35.419500 * X_2 + 27.918900 * X_3 + 19.584900 * X_4 + 55.625000 * X_1 * X_2 - 18.125000 * X_1 * X_3 - 23.125000 * X_1 * X_4 + 18.125000 * X_2 * X_3 - -18.125000 * X_3 * X_4 + 50.326800 * X_1 * X_1 + 35.326800 * X_2 * X_2 + 55.326800 * X_3 * X_3 + 55.326800 * X_4 * X_4 ; \quad (5.5)$$

В оптималната точка се получава максимална твърдост след повърхностно газоплазмено азотиране $HV_{0,05} = 1187,71$ и тя има следните кодирани и натурални координати:

- мощност на източника P –	$x_1 = 1,5$ ($Z_1 = 35$ kW);
- време на азотиране t –	$x_2 = 1,4892$ ($Z_2 = 34,8925$ s);
- разстояние “дюза-метал” l –	$x_3 = -0,8727$ ($Z_3 = 82,5458$ mm);
- разход на газ (N_2) – Q	$x_4 = - 0,6905$ ($Z_4 = 2,6191$ l/min);

По значимост факторите се подреждат така:

а) Анализирайки получените резултати при избраните граници на изменение на факторите се вижда, че най силно влияещ фактор върху твърдостта $HV_{0,05}$ на сплавта Ti-6Al-4V след повърхностно газоплазмено азотиране е мощността на източника. Това се обяснява с промяната на количеството топлинна енергия, подавана на повърхността на образеца в условията на обработката. Освен това, мощност на източника влияе и върху стабилността на дъгата, горяща в процеса на повърхностно газоплазмено азотиране;

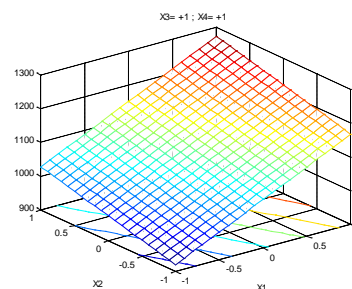
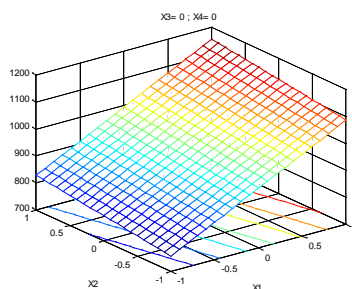
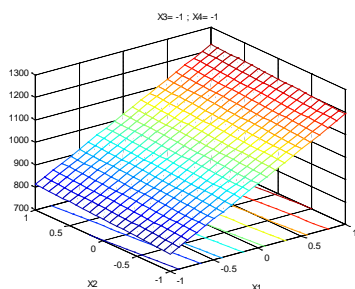
б) следващи по важност фактори за твърдостта $HV_{0,05}$ след повърхностното газоплазмено азотиране са времето на азотиране, разстоянието “дюза-метал” l и разхода на газ (N_2) при повърхностно газоплазмено азотиране, които еднозначно влияят на твърдостта.

Графичен анализ на регресионния модел на $HV_{0,05}$ в областта на оптимума. Резултати от машинната обработка на регресионните уравнения.

В края на разработката са представени диаграми с изолинии, които отразяват изменението на твърдостта (Y) във функция на мощността на източника (x_1);

времето на азотиране (x_2); разстоянието “дюза-метал” (x_3); разход на газ (x_4), където: x_1, x_2, x_3 и x_4 - са безразмерни променливи.

Обработката на статистическите данни, чрез програмен продукт “MATLAB 6.5” позволява построяването на изолинии показващи изменението на твърдостта HV0,05 на образци от сплав Ti-6Al-4V при повърхностно газоплазмено азотиране. От фиг.П2.12 до фиг.П2.14 са показани същите диаграми, в които x_1, x_2, x_3 и x_4 са представени като размерни променливи, т.е. с действителните им стойности.



Фиг. П2.12. $HV0,05 = (P, \tau)$ при $l=80$ mm; $Q=2$ l/min

П2.13. $HV0,05 = (P, \tau)$ при $l=100$ mm; $Q=4$ l/min

П2.14. $HV0,05 = (P, \tau)$ при $l=120$ mm; $Q=6$ l/min

Фиг. П2.12 ÷ 2.14. Зависимости между микротвърдостта след повърхностно газоплазмено азотиране $HV0,05$ и технологичните параметри мощността на източника (x_1); времето на азотиране (x_2); разстоянието “дюза-метал” (x_3); разход на газ (x_4)

5.2. Експериментално- статистическо изследване на оптималните режими на работа върху грапавостта на повърхнината

Замествайки стойностите им в уравнение (2.58), получаваме уравнението на регресия във вида:

$$Y(X_1, X_2, X_3, X_4) = 12.198463 + 0.988829 \cdot X_1 + 0.737976 \cdot X_2 - 1.863066 \cdot X_3 - 0.072089 \cdot X_4 - 0.1118 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.666875 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.058125 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0.633125 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.066875 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0.158 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0.693087 \cdot X_1^2 - 0.888087 \cdot X_2^2 - 0.389337 \cdot X_3^2 + 0.015663 \cdot X_4^2; \quad (5.17)$$

В оптималната точка се получава максимална грапавост след повърхностно газоплазмено азотиране $Rz= 18,48\mu\text{m}$ и тя има следните кодирани и натурални координати:

- мощност на източника P – $x_1 = -0,0044$ ($Z_1 = 19,9562$ kW);
- време на азотиране τ – $x_2 = -0,0344$ ($Z_2 = 19,6557$ s);
- разстояние “дюза-метал” l – $x_3 = -0,0000$ ($Z_3 = 99,9992$ mm);
- разход на газ (N_2) – Q $x_4 = 0,0004$ ($Z_4 = 4,0007$ l/min);

По значимост факторите се подреждат така:

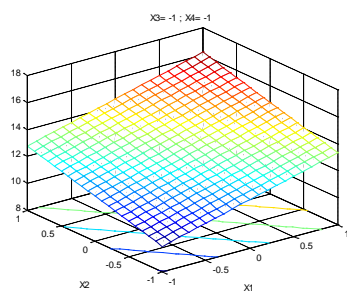
а) Анализирайки получените резултати при избраните граници на изменение на факторите се вижда, че най силно влияещ фактор върху максималната грапавост на повърхнината Rz , след повърхностно газоплазмено азотиране е мощността на източника. Това се обяснява с промяната на количеството топлинна енергия, подавана на повърхността на образеца в условията на обработката. Освен това, мощност на източника влияе и върху стабилността на дъгата, горяща в процеса на повърхностно газоплазмено азотиране;

б) следващ по важност фактор за Rz , е разстоянието “дюза-метал” l , като в областта на оптимума неговата значимост е около 90% от тази на мощността на източника, P .

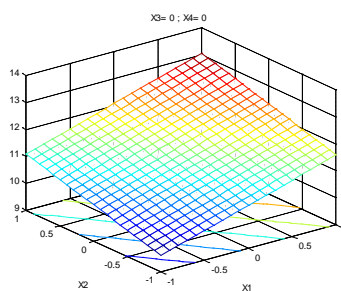
в) следващи по важност фактори за Rz след повърхностното газоплазмено азотиране са времето на азотиране, и разхода на газ (N_2) при повърхностно газоплазмено азотиране, които еднозначно влияят на максималната грапавост.

Графичен анализ на регресионния модел на Rz в областта на оптимума. Резултати от машинната обработка на регресионните уравнения.

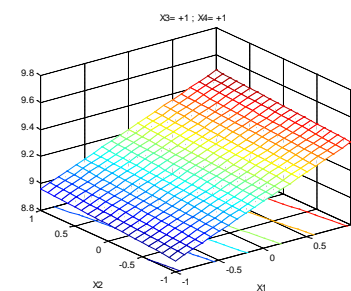
Обработката на статистическите данни, чрез програмен продукт "MATLAB 6.5" позволява построяването на изолинии показващи изменението на максималната грапавост (Rz) на образци от сплав Ti-6Al-4V при повърхностно газоплазмено азотиране. На фиг.П2.30÷фиг.П2.32 са показани същите диаграми, в които x_1, x_2, x_3 и x_4 са представени като размерни променливи, т.е. с действителните им стойности.



Фиг. П2.30. $Rz = (P, \tau)$
при $l = 80 \text{ mm}$; $Q = 2 \text{ l/min}$



П2.31. $Rz = (P, \tau)$
при $l = 100 \text{ mm}$; $Q = 4 \text{ l/min}$



П2.32. $Rz = (P, \tau)$
при $l = 120 \text{ mm}$; $Q = 6 \text{ l/min}$

Фиг. П2.30 ÷ 2.32. Зависимости между максималната грапавост на повърхнината Rz и технологичните параметри мощността на източника (x_1); времето на азотиране (x_2); разстоянието "дюза-метал" (x_3); разход на газ (x_4)

5.3. Микроструктурен анализ на Ti-6Al-4V след плазмено азотиране.

Микроструктурата на азотираната сплав Ti-6Al-4V е показана на фиг.5.1. Микроструктурата показва трите зони формиращи се по време на азотирането: смесен от различни фази слой, дифузионната зона и основата. При повечето от образците има ясна граница между смесения слой и дифузионната зона.

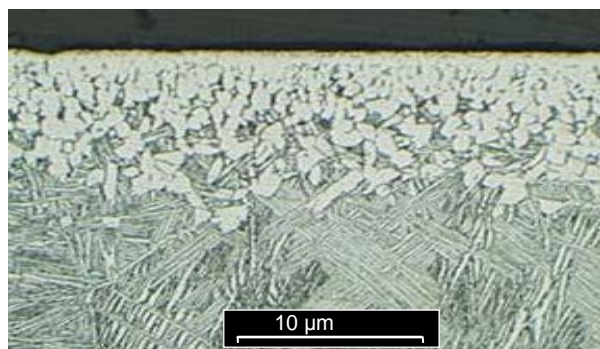
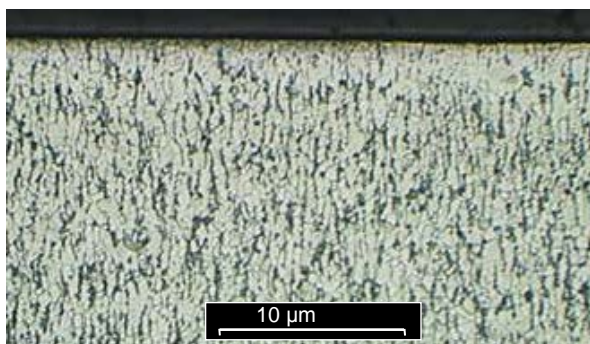
Смесения слой покрива цялата повърхност на образеца. Той е твърд, тънък и крехък. Дебелината му за азотиранни проби, за време от 20 и 30s варира от 2 до 10 μm . С удължаване на времето и увеличаване на мощността се увеличава дебелината му. Под азотиранния слой е дифузионната зона. С увеличаване на мощността от 18kW на 35kW и времето от 15 на 20s, дебелината на азотиранния слой нараства.

Анализа на Ti-6Al-4V след плазмено азотиране при мощност 18kW, 25kW и 35kW за време 10s, 20s и 30s показва разлика за тази сплав. Микроструктурата е хомогенна за проби плазмено азотирани при 18kW и нехомогенна за проби азотирани при 25kW и 35kW. Част от резултатите на изследваната микроструктура са показани на фиг.5.2 и фиг.5.3. Вероятно, тази разлика се дължи на фазовите $\alpha \leftrightarrow \beta$ трансформации които се появяват при 25kW и 35kW мощност, водещо до висока температура на повърхностния слой на детайла за азотиране.

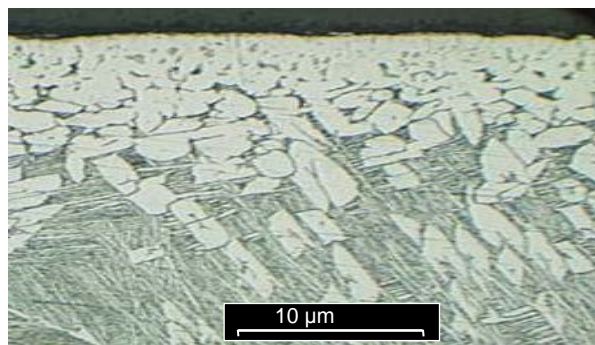
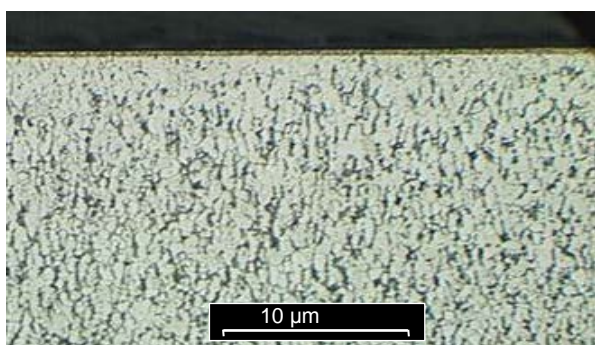
За всички проби, плазмено газово азотирани с индиректен плазмотрон в камера при мощност 35kW дифузионния слой се състои от два слоя. Първият е непосредствено под повърхностния азотиран слой, който е непрекъснат α твърд разтвор, обогатен с азот. В повечето случаи това е равномерен бял слой, образуван по-време на процеса плазмено газово азотиране с последвало охлаждане. Дебелината на този слой може да се увеличи с увеличаване времето на азотиране. Вторият слой, който е под първия и над вътрешната невзаимодействала основа, се

състои от бели едрозърнести колони и фина структура, наподобяваща основния слой. Тези едри зърна нараснали в дълбочина, са обикновено наклонени, а в някои места са и по-границите на зърната на основата.

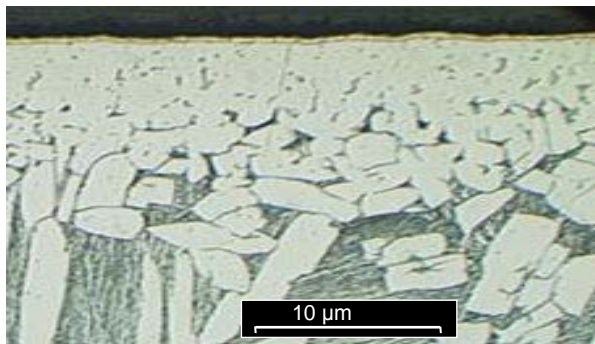
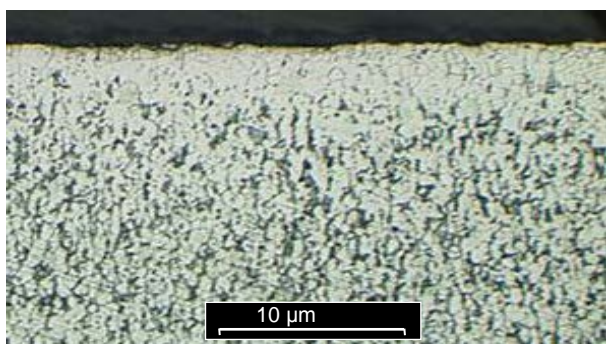
Този слой най-вероятно се формира по-време на охлаждането в резултат на $\beta\text{-Ti(N)} \rightarrow \alpha\text{-Ti(N)}$ фазовите трансформации. Това е най-вероятно β фаза обогатена с азот, която по-време на охлаждане се е трансформирала в $\alpha\text{-Ti(N,O)}$ фаза. От своя страна при по-нататъшно охлаждане $\alpha\text{-Ti(N,O)}$ фаза може да отдели титанови нитриди. Разтворимостта на азота е много по-малка в β отколкото в α фаза. В резултат на това, стойностите на микротвърдостта във втората зона са много по-ниски отколкото в първата зона.



10 s.



20 s.

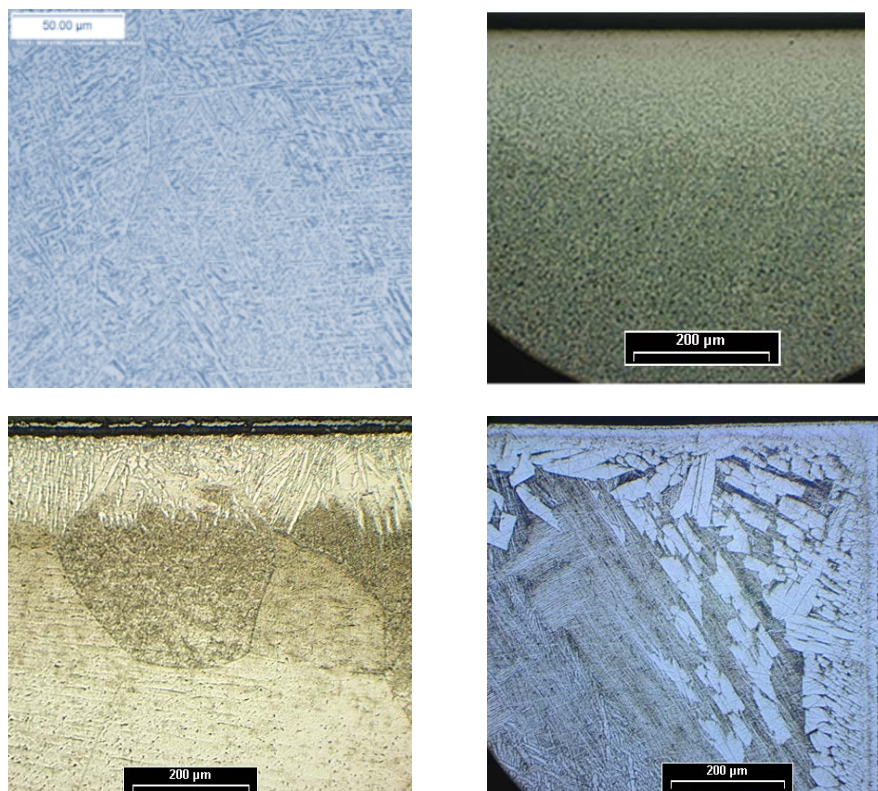


30 s.

18 kW

35 kW

Фиг.5.2. Микроструктура на Ti-6Al-4V след плазмено газово азотиране при 18kW и 35kW за 10, 20 и 30s



Фиг.5.3. Микроструктура на Ti-6Al-4V след плазмено газово азотиране при 25kW за 10, 20 и 30s

С увеличаване на мощността от 18kW до 35kW, се увеличава дебелината на азотираните слоеве. Това се дължи на увеличаването на дифузионния коефициент, който нараства с увеличаване на температурата. Обикновено увеличаването на дифузионното време от 15 на 30s води до увеличаване на дебелината на слоя. Максималната дебелина на плазмено азотирания слой варира между 10 и 35μm, което може да се види от графиката за микротвърдостта.

5.4. Фазов анализ на Ti-6Al-4V след плазмено газово азотиране.

Фазов анализ на обработените проби показва, че първоначално образеца от Ti-6Al-4V е съставен от hcp α-Ti (Фиг.5.4. и фиг.5.5).

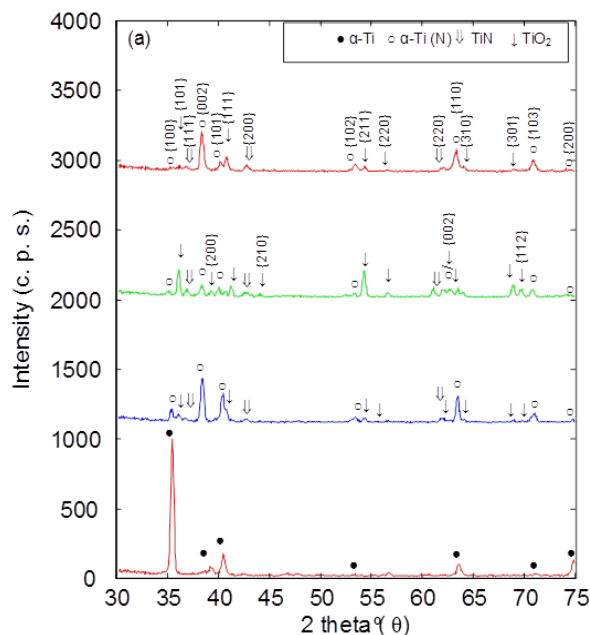
По време на плазменото газово азотиране и последвалото охлаждане α-Ti се превръща в α-Ti(N) който има хексагонална кристална структура, TiN-стенно-центрирана кубична структура и TiO₂-тетрагонална кристална структура. α-Ti(N) фаза се различава от α-Ti тъй като пиковете принадлежащи на hcp структура се преместват към по-ниските градуси на 2θ ъгли, означаващо нарастване на параметрите на решетката дължащо се на взаимодействието с азота. Наличието на кислород е също възможно, но се очаква да бъде в много по-малко количество в сравнение с азота.

Фазовите превръщания осъществяващи се по-повърхността на образеца по време на плазмено газовото азотиране могат да бъдат представени като:



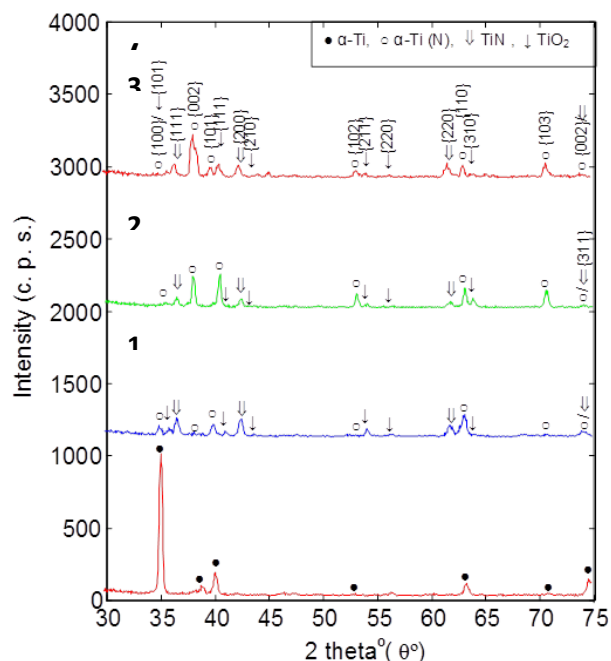
Тетрагоналната Ti₂N фаза не бе открита при X-ray дифракционния резултат. Въпреки, че азота използван и като плазмообразуващ газ и като активна азотна среда, бе с много-висока чистота (99.998%) при всички експерименти имаме наличие на тетрагоналната TiO₂ фаза заедно с TiN в повърхностния азотиран слой.

Първата причина за наличието на TiO_2 може да бъде, че независимо от високата чистота на азота и аргона използвани в процеса, е възможно наличието на минимални, но достатъчни количества O_2 в бутилките. Втората причина може да бъде, че има макар и минимални пропуски в камерата където се извършва процеса азотиране. Формирането на окисния филм може да бъде обяснено още и с наличието на температури по повърхността на образеца над $800^\circ C$, над която температура активността на кислорода е много висока.



Фиг.5.4. Дифракционна картина и рентгено - фазов анализ на Ti-6Al-4V след плазмено азотиране с индиректен плазмотрон при мощност 18kW за 10, 20 и 30s

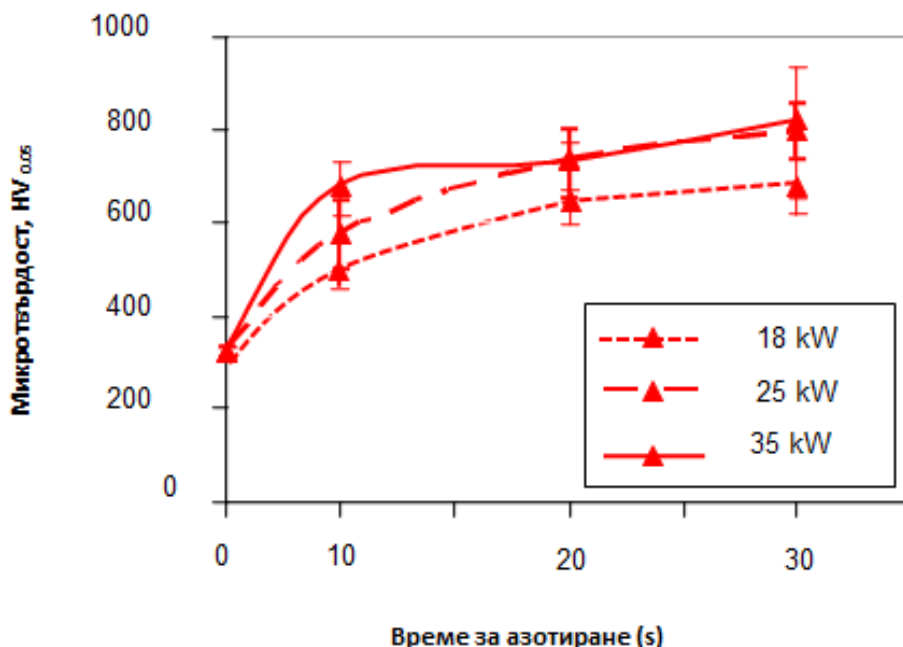
Фиг.5.5. Дифракционна картина и рентгено - фазов анализ на Ti-6Al-4V след плазмено азотиране с индиректен плазмотрон при мощност 35kW за 10, 20 и 30 s



В Ti-6Al-4V се съдържа 6% Al. Въпреки относително голямото количество на този елемент, върху повърхността на пробите няма образувани алуминиеви нитриди по време на високо температурното газоплазмено азотиране с индиректен плазмотрон. Отделянето на тези фази във дифузионната зона под съставения от различни компоненти(кампаунд) слой, не може да бъде установено чрез рентгенови измервания на повърхността на образеца, затова е необходимо да бъдат направени допълнителни изследвания.

5.5. Твърдост на плазмено азотирана титанова сплав Ti-6Al-4V.

Направени са измервания на повърхностната твърдост на образци азотирани при различни мощности, а някои от резултатите са показани на фиг.5.6.



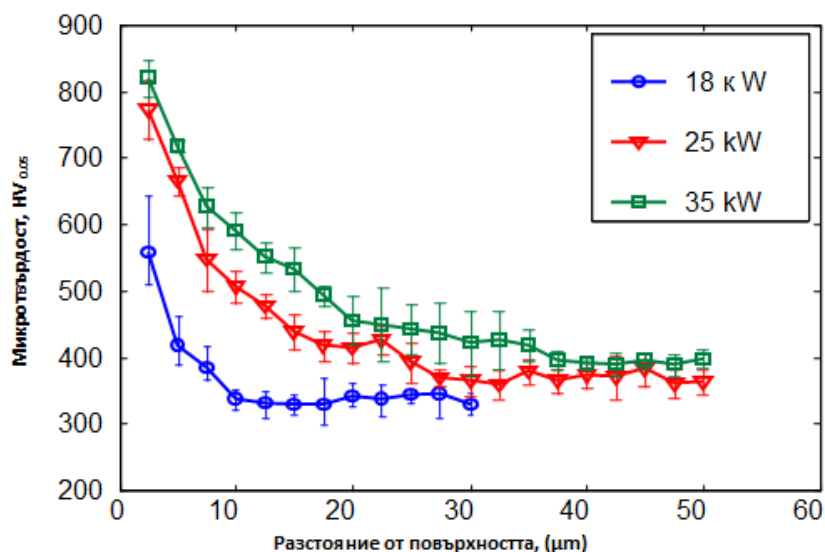
Фиг.5.6. Твърдост на Ti-6Al-4V след плазмено газово азотиране при мощност 18kW, 25kW и 35kW за време 15, 20 и 30s

Вижда се, че твърдостта се увеличава с увеличаване на времето за азотиране. Увеличаването на твърдостта най-вероятно се дължи на новите фази като TiN и TiO₂, формирани върху повърхността на образеца по време на азотирането. Няма чувствителна промяна на повърхностната твърдост при увеличаване на мощността.

Дебелината на азотираните слоеве е установена чрез измерване на микротвърдостта, тъй като се предполага, че азотираният слой свършва там, където стойността на микротвърдостта се доближава до микротвърдостта на основния материал.

С увеличаване на мощността от 18kW до 35kW се увеличава дебелината на азотираните слоеве. Дебелината за тази сплав варира от 5 до 35 μm, което зависи от повърхностната температурата и времето за плазмено азотиране. Няма ясна граница между дифузионната зона и основата поради което трудно може да се установи точната до микрон дебелина на азотираните слоеве чрез микроструктурния анализ.

Фигура 5.7 показва, че дебелината на азотираните слоеве и твърдостта се променят (увеличават) с увеличаването на мощността, респективно температурата при плазмено газово азотиране, като максималната микротвърдост за Ti-6Al-4V е 825HV_{0.05} за проби азотирани при 35kW за време 30s.



Фиг.5.7. Микротвърдост на Ti-6Al-4V след плазмено газово азотиране при различни мощности за време 25 s

5.6. Изследване параметрите характеризиращи грапавостта след плазмено газово азотиране.

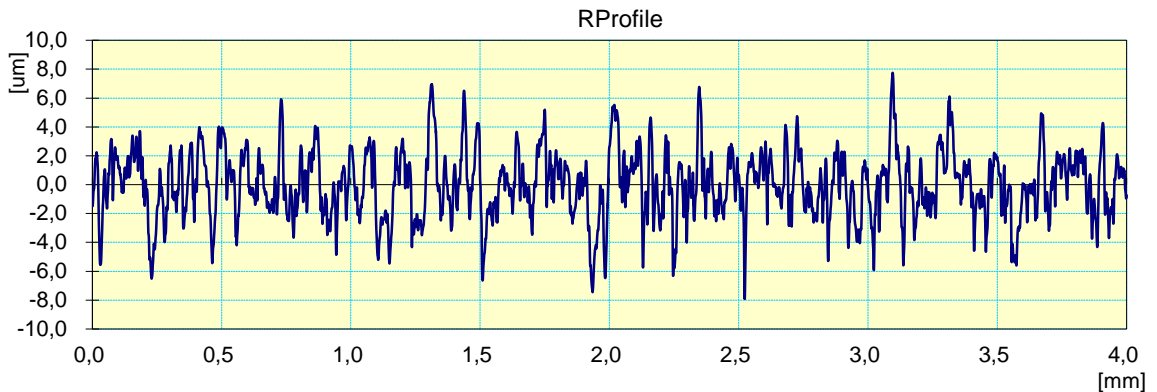
Повърхнините на детайлите след плазменото азотиране не са идеално гладки. По тях са разположени в определен ред или произволно издатини и падини с определена височина и форма и сравнително малка стъпка, известни под наименованието грапавини.

Експерименталните изходни образци са измерени с установката показана на фиг.5.8, в две съседни сечения след плазмено азотиране, за да се обхване целия изследван участък.



Фиг. 5.8. Установка за измерване на грапавост Mitutoyo SurfTest SJ301

Получените профилограми са съвкупност от грапавини, които оформят релефа на повърхнината получена преди и след плазмено азотиране и се оценяват в участък, несъдържащ отклонения на формата и вълнообразност.



Фиг.П2.11 Профилограми на азотираните образци: $l=80\text{mm}$; 30s ;

На базата на проведения експеримент се вижда, че най голяма стойност на осреднената височина на грапавините (R_z) се получава при $l=80\text{mm}$ и време на въздействие 30s с максимална стойност в порядъка на $13,52\mu\text{m}$, а най-малка стойност $6,13\mu\text{m}$, за $l=120\text{mm}$ и време на въздействие 20s .

5.7. Анализ и изводи:

Получените резултати от проведеното изследване за ефективността на работа на плазмотрон PTN50 комплектуван с катод с три електрода, дават основание да направим следните изводи:

1. Създаден е математичен модел и е разработен софтуерен продукт за определяне на оптималните технологични условия за плазмено нитриране на титанова сплав Ti-6Al-4V.

2. Установено е, че фазовият състав на най-външния повърхностен слой след плазмено газово азотиране е $\alpha\text{-Ti(N)}$ и TiO_2 с дебелина варираща между 1 и $3\mu\text{m}$.

3. Микроструктурата за плазмено азотирани при мощност 18kW и 25kW за различни периоди от време е еднородна и хомогенна. При увеличаване мощността до 35kW , респективно на температурата, довеждащо до температури над тяхната β трансформационна, микроструктурата се променя към неравномерна за всички периоди от време.

4. Времето на въздействие влияе върху микротвърдостта на повърхностните слоеве при азотиране, като при мощност 25kW и време 10s е $580\text{HV}0.05$, а за 30s въздействие е в рамките на $780\text{HV}0.05$. Получените стойности за повърхностната твърдост вероятно се дължат на новоформираните фази - $\alpha\text{-Ti(N)}$ и TiO_2 .

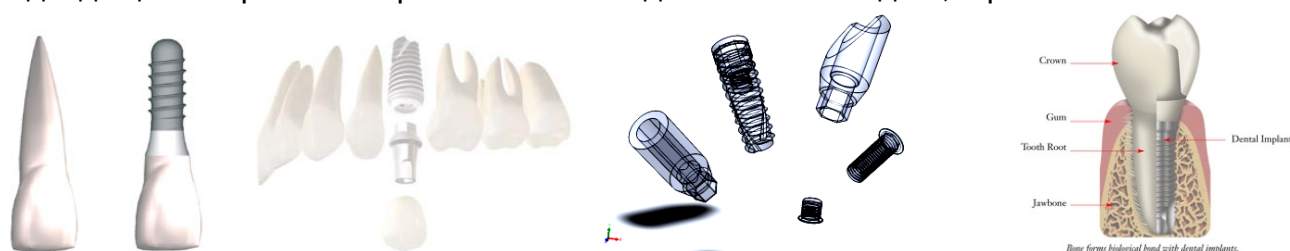
5. Установено е, че дълбочината на азотирания слой варира от 10 до $32\mu\text{m}$ и зависи от технологичните параметри.

6. Определено е влиянието на технологичните параметри на режима върху максимална стойност на грапавините (R_z). Установено е, че максимална стойност на грапавините се получава при режим: сила на тока – 500A , L - 80mm и време на въздействие t - 30s и е в порядъка на $13,52\mu\text{m}$, а най-малка измерена стойност е $6,13\mu\text{m}$, при режим $l=120\text{mm}$ и време на въздействие 20s .

ГЛАВА VI. РАЗРАБОТВАНЕ НА ТЕХНОЛОГИИ ЗА ПЛАЗМЕНОТО ГАЗОВО ПОВЪРХНОСТНО АЗОТИРАНЕ НА ДЕТАЙЛИ ОТ ТИТАНОВА СПЛАВ Ti-6Al-4V С ИНДИРЕКТЕН ПЛАЗМОТРОН.

6.1. Разработване на технология за плазменото газово повърхностно азотиране на импланти от титанова сплав Ti-6Al-4V с индиректен плазмотрон.

Зъбните импланти представляват коренно-оформени импланти и служат като заместители на естествените зъбни корени в зоните на липсващите зъби. Зъбният имплант е изкуствен зъбен корен, който позволява стабилност за изкуствената корона. Задържането на зъбните импланти в костта осигурява стабилна основа за зъбите, а от друга страна запазва и съответната област от челюстта във функционална годност. Важно условие за добра остеоинтеграция е повърхностната грапавост. Медицински изследвания в това направление доказват, че най-подходяща повърхностна грапавост Ra е в диапазона от 1 до 1,82 μ m (фиг 6 1)



Фиг.6.1. Заместването на зъбните корени със зъбни импланти

Когато по някакви причини се загубят зъби, костта която е поддържала техните корени се стопява и смалвява. Зъбните импланти запазват костта във функционална и анатомична цялост, като по този начин костта осигурява стабилност на зъбните импланти.

6.2. Създаване и изследване на повърхностно азотирани слоеве върху титанови зъбни импланти.

Ниската повърхностна твърдост и износоустойчивост ограничават приложението на титановите сплави в медицината, особено там където имплантите работят в условия на контактни натоварвания и триене. За целта на изследването, бяха подготвени реални образци на зъбни импланти от Ti-6Al-4V разпределени в три групи. С цел подобряване на повърхностната твърдост е разработена технология за повърхностното плазмено газово модифициране (азотиране) с използване на индиректен плазмотрон. За експериментите бе използвана апаратура АПН 50, комплектована с индиректен плазмотрон РТН 50 в камера с азот (N₂) с чистота 99.998% и постоянен разход от 100 ml/min.

Проведените наши изследванията показаха [151,152], че повърхностното азотиране на зъбни импланти от Ti-6Al-4V чрез ниско температурна плазма е с решаващо значение за формиране на бърза и добра остеоинтеграция. С цел създаване на технология за повърхностно азотиране с индиректен плазмотрон на зъбни импланти и на база получените резултати от структурните изследвания, проведени в глава 4 и 5, бе избран технологичен режим:

- Сила на тока, A	450
- Напрежение, V	55
- Разход плазмообразуващ газ:	
- Аргон (Ar), l/min	20
- Азот (N ₂), l/min	4

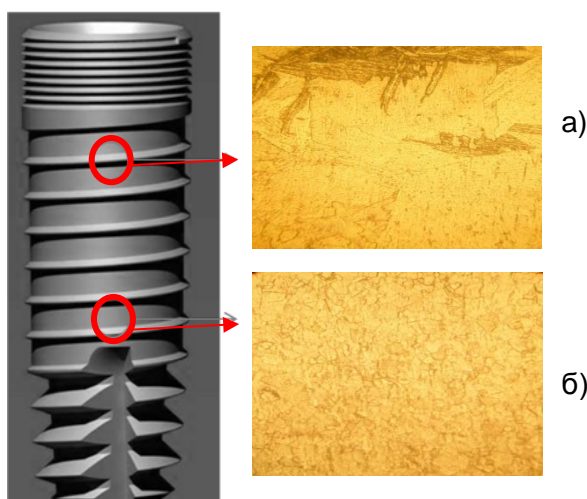
-Разстояние от края на дюзата до образеца, mm 100
 Образците са азотирани без претапяне на повърхностния слой за време 10 20 и 30s. При всички режими зоната на азотиране придобива златист цвят фиг.6.4.



а) б) в)

Фиг.6.4. Дентални импланти с плазмено азотирани за различен период от време

При повечето от изследваните образците има ясна граница между смесения слой и дифузионната зона по върха на резбата (фиг.6.5 а) и хомогенна структура в падината на резбата (фиг.6.5 б).

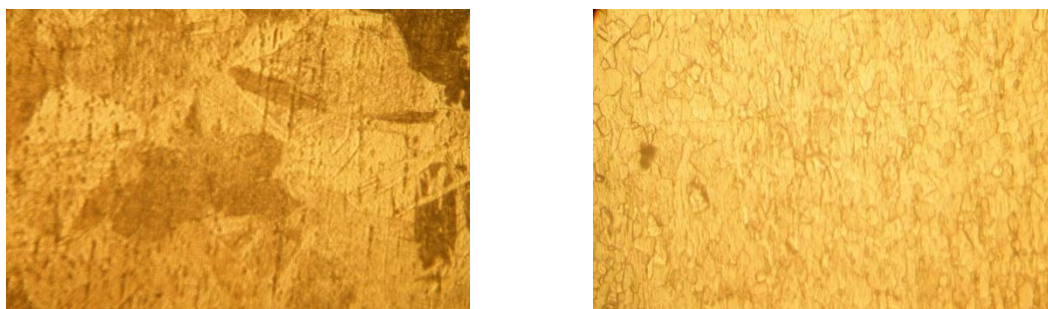


а)

б)

Фиг. 6.5. Микроструктура на зъбния имплант от Ti-6Al-4V след плазмено газово азотиране

Смесения слой покрива цялата повърхност на импланта. Той е твърд, тънък и крехък. Дебелината му за азотираните проби, за време от 20 и 30s варира от 2 до 10µm. Анализа на микроструктурата на зъбните импланти в падината на резбата след плазмено азотиране показва, че микроструктурата е хомогенна за всички проби(фиг.6.6).



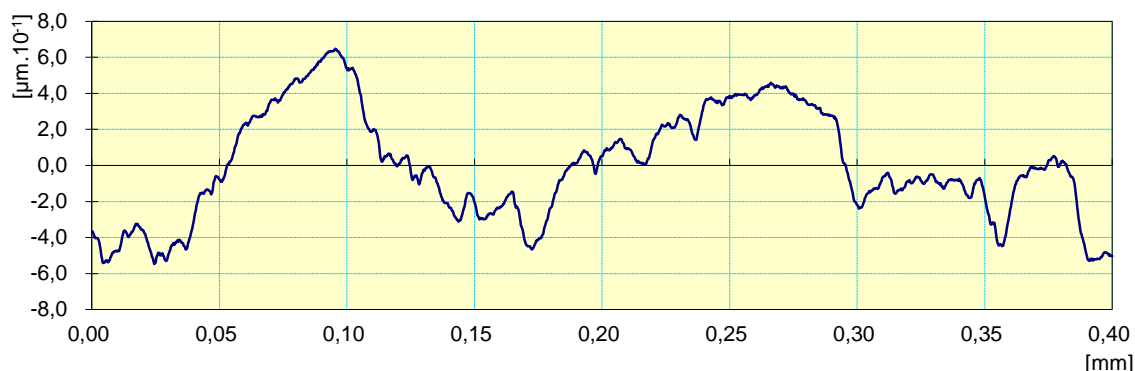
Фиг.6.6. Микроструктура на плазмено азотирани зъбни импланти:
 а) по върха на резбата; б) падината на резбата

Измерванията на микротвърдост се осъществяват с използване на методиката от глава 2, точка 2.8 от дисертацията. Измерената микротвърдост на зъбния имплант е 380 HV_{0,05/10}, при изискване на фирмите производители 450HV_{0,05/10}

Грапавостта се измерва с използване на методиката от точка 2.9, глава 2 от дисертацията. Тя има стойности $R_a=0,44\mu\text{m}$, при изискване максимум $0,50\mu\text{m}$ /таблици 6.2/. Графично резултата от измерването е представен на фигура 6.7.

Табл.6.2. Резултати от измерване на грапавост

Операция	$R_a, \mu\text{m}$
Изходна	0,44
След азотиране	1,44



Фиг.6.7. Графични резултати от измерване на грапавост

Плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон се изпълнява в съгласно избрания технологичен режим. Плазмотрона стартира процеса на азотиране от 10 до 15mm преди върха на импланта вляво и завършва също на 10 до 15mm вдясно на обработвания участък. Процесът се изпълнява в следната последователност:

1. Пускане на охлаждащата вода;
2. Проверка на високочестотния импулс;
3. Пускане на плазмообразуващия газ Ar/N_2 ;
4. Стартиране на източника плазмотрона 600A/180V;
5. Включване на блока за управление;
6. Подаване на високочестотен импулс;
7. Стартиране на приспособлението за движение;
8. Стартиране на работната дъга;
9. Пускане на плазмотрона в движение по предварително зададена траектория.

След приключването на работния цикъл, операциите се изпълняват в обратен ред.

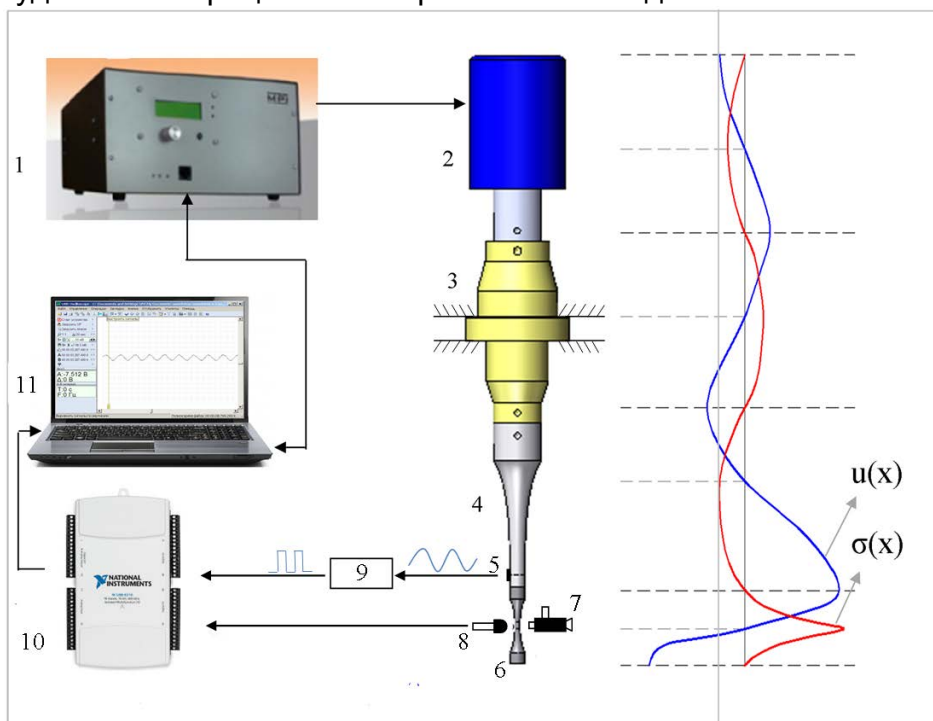
Грапавостта след провеждане на плазмено газово азотиране има стойност $R_a=1,44\mu\text{m}$ а средната микротвърдост на азотираните участъци има стойност 483HV_{0,05/10}, удовлетворяващи изискванията на българските и световни стандарти[89].

6.3. Разработване на технология за плазменото газово повърхностно азотиране на сонотрод към стенд за ултразвуково резонансно изпитване на умора при честота 20kHz.

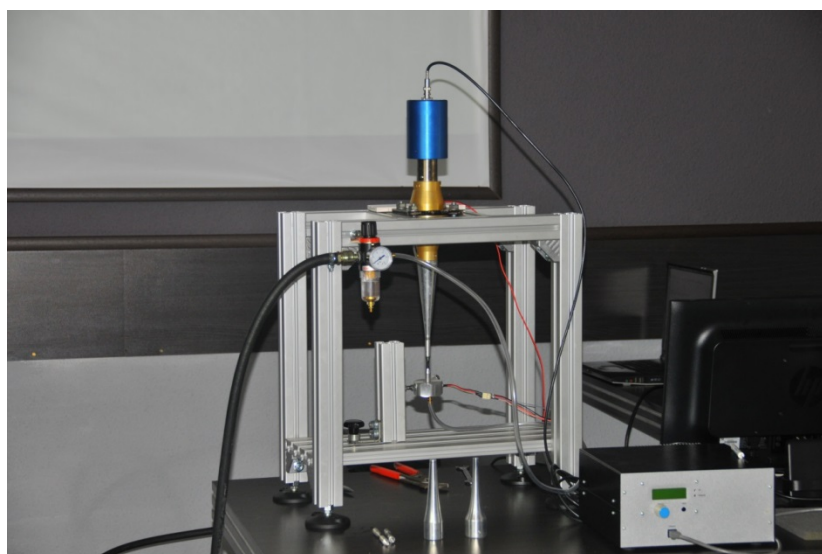
В настоящото изследване са представени принципа на работа, устройството и технологията на изработка на сонотрод към стенд за ултразвуково резонансно изпитване на умора при честота 20kHz.

Изработването на сонотрода е в резултат от реализирането на проект ДМУ03/98 от 2011г. на тема: „Изследване якостта на нови синтеровани материали с приложение в автомобилната промишленост при циклично натоварване“ финансиран от Фонд „Научни изследвания“ по програма „Млади учени“ .

Схема на разработеният стенд е показана на фиг.6.8. Принципът на действие е следният: Генераторът (1) подава синусоидален ел. сигнал ($\max 1000V$ RMS) с необходимата честота на пиезокерамичният преобразувател (трансдюсер) (2), който превръща сигнала в механични вибрации ($\max 20\mu m$ p-p). Бустерът (3) е опционален елемент. Неговата функция е да осигурява здраво закрепване на системата за фундамента и поради това се проектира с фланец във възела така че закрепването да не натоварва ултразвуковата система. При разлика във входящия и изходящия диаметър бустерът може да усилва/намаля амплитудата на вибрациите. Сонотродът (4) , наричан още вълновод или концентратор, е задължителен елемент. Изработва се с променливо напречно сечение, за да концентрира ултразвуковата енергия и усилва амплитудата на механичните вибрации. Образецът (5) се проектира симетричен, така че средното му сечение да е възел на преместване, съответно в него да възниква максимално напрежение. Всички елементи са проектирани, така че да работят в еластичната област т.е. връзката между амплитудата на вибрациите и напреженията в отделните елементи е линейна.



Фиг.6.8. Схема на стенд за изпитване на умора разработен в ТУ-Варна
1.Генератор 1kW (MPInterconsulting-Switzerland); 2.Пиезокерамичен конвертор (MPInterconsulting-Switzerland); 3.Бустер 1:1.5(MPInterconsulting-Switzerland); 4.Сонотрод; 5.PVDF сензор; 6.Тестов образец; 7.Вихрова тръба; 8.IR термометър; 9.Компаратор; 10 АЦП; 11.Компютър.

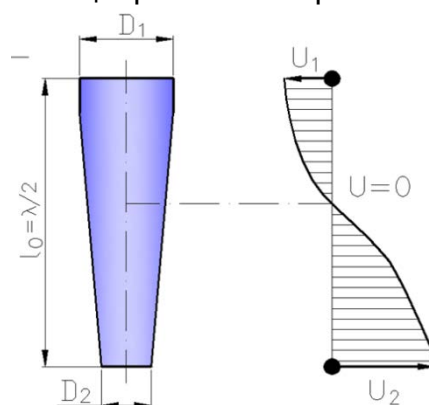


Фиг.6.9. Стенд за ултразвуково резонансно изпитване на умора при честота 20kHz

Сонотродът е уникален за всяко приложение елемент. За осигуряване на възможности за изпитване на голям набор от материали с различна якост за стенда (фиг.6.9) са необходими няколко сонотрода. Проектирането и изработката на сонотроди и беше задача решавана от колектива на ТУ-Варна работещ по проекта.

Дължината на сонотрода най-често е равна на половината от дължината на звуковата вълна ($L_0 = \lambda/2$). Ако е изпълнено условието $D \leq L_0/4$ сонотрода може да се приеме за строен елемент и пресмятанията може да се опростят до 1D задача, като се пренебрегне влиянието на напречните вълни т.е напречните сечения остават равнинни и се преместват само в надлъжно направление (коэффициента на Поасон на материала е равен на нула) [4].

Разпределението на амплитудата на надлъжните вибрации в отделните сечения на $\lambda/2$ сонотрод работещ в резонансен режим е показано на фиг.6.10.



Фиг.6.10. Амплитуда на надлъжните вибрации в сонотрод с дължина $l_0 = \lambda/2$ при резонансна честота

Проектирането на сонотрода се извършва в следната последователност :

- избор на работна честота;
- премятане на необходим коефициент на усилване;
- избор на материал и технология за изработване;
- определяне на еластичните и физични константи на материала;

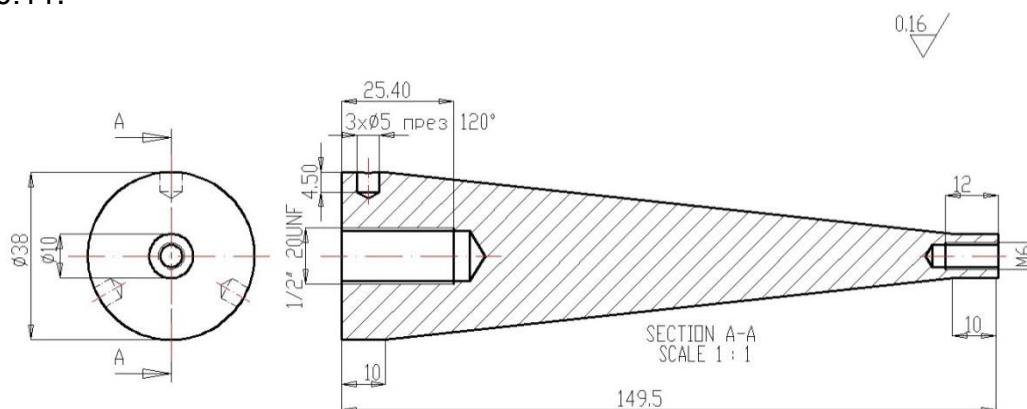
- избор на форма;
- пресмятане на дължината на сонотрода;
- уточняване на окончателни размери чрез изследване на собствените честоти по МКЕ.

В практиката най-разпространени са сонотроди с конусен профил. Материалите от които се изработват ултразвуковите елементи трябва да имат ниско акустично съпротивление и достатъчна якост на умора. Подходящи материали са титанови сплави, табл.6.3. Препоръчително е да се определят модула на Юнг и плътността директно на заготовката за изработка на сонотрода. Опитта показва, че в повечето случаи измерената плътност е близка до табличната, но модула на Юнг може да варира с около $\pm 5\%$ от табличните стойности.

Табл.6.3. Свойства на сплави подходящи за изработка на сонотроди[5]

Материал	Плътност	Модул на Юнг	Коеф. на Поасон	Скорост на надлъжна вълна (1D)	Акустично съпротивление	Якост на умора*	Твърдост
	ρ [kg/m ³]	E, [GPa]	ν	$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, [$\frac{m}{s}$]	$Z = \sqrt{\rho \cdot c}$	σ_{-1} , [MPa]	HV
Ti-6Al-4V	4430	113.8	0.341	5068	4738	300-510	340-360

Работен чертеж на изработен от Ti-6Al-4V сплав конусен сонотрод е показан на фиг.6.11.



Фиг.6.11. Работен чертеж на конусен сонотрод Ti-6Al-4V (20136Hz)

6.4. Създаване и изследване на повърхностно азотирани слоеве върху сонотрод от титанова сплав Ti-6Al-4V чрез прилагане на индиректен плазмотрон.

За подобряване на акустичните свойства на сонотрода изработен от титанова сплав Ti-6Al-4V е разработена технология за повърхностно плазмено газово модифициране (азотиране) с използване на индиктен плазмотрон. За експериментите бе използвана апаратура АПН 50, комплектувана с индиректен плазмотрон PTN 50 в камера с азот (N₂) с чистота 99.998% и постоянен разход от 220 ml/min.

Проведените наши изследванията показаха, че повърхностното азотиране на сонотрода чрез ниско температурна плазма е с важно значение за ултразвуковото резонансно изпитване на образци на умора при честота 20kHz.

С цел създаване на технология за повърхностно азотиране с индиректен плазмотрон на сонотрод, бе разработен технологичен режим:

- Сила на тока, А 500
- Напрежение, V 70
- Разход плазмообразуващ газ:
- Аргон (Ar), l/min 30
- Азот (N₂), l/min 6
- Разстояние от края на дюзата до образеца, mm 120

При азотирането бяха използвани получените резултати за същата титанова сплав описани и изследвани в глава 5 от настоящата дисертационна работа.

С цел оптимално обхождане на външната повърхност от плазмотрона, сонотрода е закрепен в приспособление (оптична делителна глава) междуцентри.

- Обороти на въртене на детайла 320 min⁻¹,
- Движение на плазмотрона- възвратно постъпателно 1,44 mm/min;
- Време за азотиране на прехода 2 min

Азотирането на повърхностния слой на сонотрода се извършва с използване на локално плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон без претапяне на повърхността.

Измерванията на микротвърдост се осъществяват с използване на методиката от глава 2, точка 2.8 от дисертацията. Измерената след шлифване микротвърдост на сонотрода е 430HV_{0,2/10}, при изискване 670HV_{0,2/10} /табл. 6.4/.

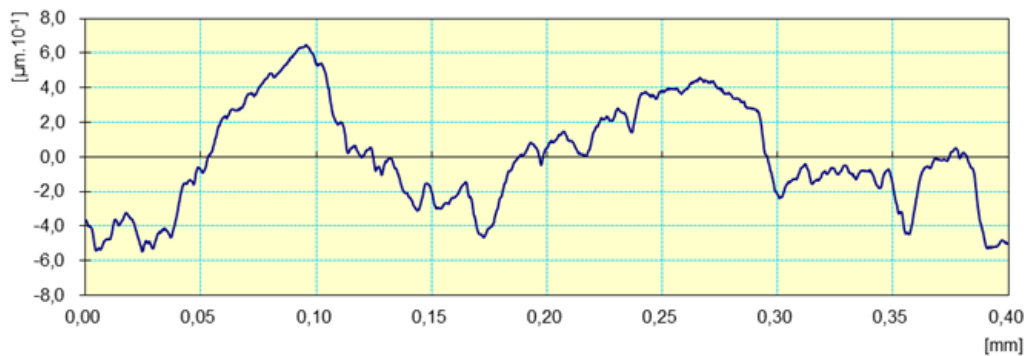
Табл.6.4. Резултати от измерването на твърдост на сонотрод

Място на измерване, °	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Твърдост, HV _{0,2/10}												
След шлифване	423	419	417	442	444	439	431	425	427	435	431	427
След азотиране и полиране	685	689	686	688	682	685	681	679	675	683	677	684

Табл.6.5 Резултати от измерване на грапавост на сонотрод

Операция	Ra, μm
Шлифване	0,61
Азотиране	0,98

Грапавостта след шлифване се измерва с използване на методиката от точка 2.9, глава 2 от дисертацията. Тя има стойности Ra=0,61μm. Данните от изходната грапавост, както и тези след повърхностно азотиране и последваща механична обработка са представени в табл.6.5. Графично резултата от измерването е представен на фигура 6.14.



Фиг. 6.14. Графични резултати от измерване на грапавост на сонотрода след шлифване

Плазменото газово азотиране на сонотрода стартира от 10 до 15mm извън двата му края. Процесът се изпълнява в следната последователност:

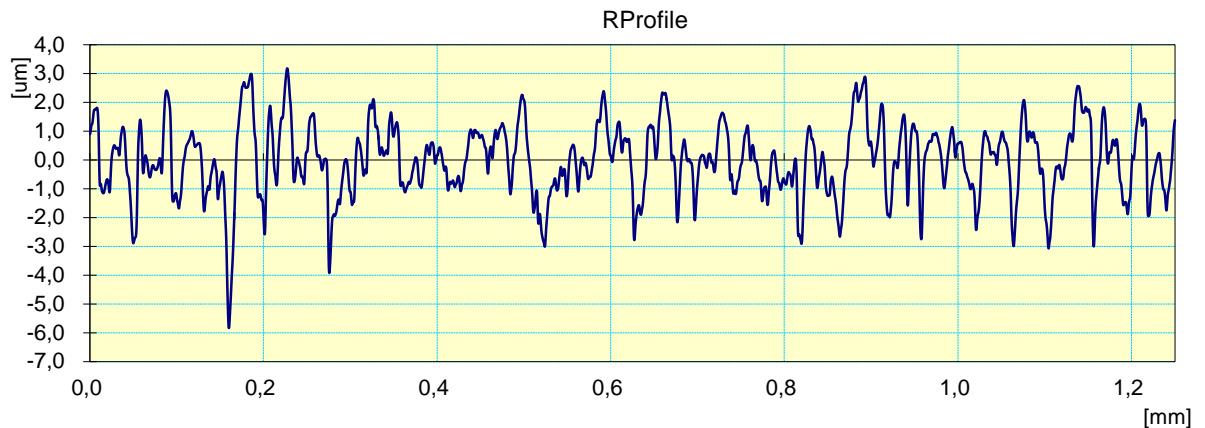
1. Пускане на охлаждащата вода;
2. Проверка на високочестотния импулс;
3. Пускане на плазмообразувачия газ Ar/N₂;
4. Стартиране на източника плазмотрона 600A/180V;
5. Включване на блока за управление;
6. Подаване на високочестотен импулс;
7. Стартиране на приспособлението за движение;
8. Стартиране на работната дъга;
9. Пускане на плазмотрона в движение по предварително зададена траектория.

След приключването на работния цикъл, операциите се изпълняват в обратен ред. Азотирането на сонотрода се извършва в 8 прехода. Получената азотирана повърхност на сонотрода е показана на фиг.6.15.



Фиг. 6.15. Сонотрод след повърхностно плазмено азотиране

Грапавостта след провеждане на плазмено газово азотиране при повърхностното обработване на сонотрода има стойност Ra=0,98μm (фиг.6.16).



Фиг. 6.16. Графични резултати от измерване на грапавост на сонотрод

След извършване на повърхностното азотиране на сонотрода, същия е монтиран към стенд за ултразвуково резонансно изпитване на умора при честота 20kHz, фиг.6.8. поз.4 и е въведен в експлоатация. Към 01.10.2014г. няма данни за възникнали неизправности по лабораторния стенд.

6.5. Изводи.

1. Изпълнено е плазмено газово азотиране на зъбни импланти с индиректен плазмотрон без претапяне на повърхността. Установено е, че използваната технология за азотиране на детайли с малки размери- дентални импланти е работоспособна.

Азотирането е проведено при режима:

- Сила на тока, A	450
- Напрежение, V	55
- Разход плазмообразуващ газ:	
- Аргон (Ar), l/min	20
- Азот (N ₂), l/min	4
- разстояние от края на дюзата до образеца, mm	100

В следствие на извършения процес на плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон получената изходна средна микротвърдост 683HV_{0,05/10} и грапавост на повърхнината $R_a=1,44\mu\text{m}$. Получените резултати отговарят на изискванията за качество на зъбните импланти, по-отношение на микротвърдост и грапавост на микро и макро дизайна на зъбните импланти.

2. Извършено е азотиране на сонотрод от стенд за ултразвуково резонансно изпитване на умора при честота 20kHz с използване на плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон без претапяне на повърхността. Азотирането протича с използване на режима от точка 6.4, глава 6 от дисертацията.

Азотирането е проведено при режима:

- Сила на тока, A	500
- Напрежение, V	70
- Разход плазмообразуващ газ:	
- Аргон (Ar), l/min	30
- Азот (N ₂), l/min	6
- Разстояние от края на дюзата до образеца, mm	120
-Обороти на въртене на детайла 320 min ⁻¹ ,	
- Движение на плазмотрона- възвратно постъпателно 1,44 mm/min;	

- Време за азотиране на прехода 2 min

Грапавостта след провеждане на плазмено газово азотиране при повърхностното обработване на сонотрода има стойност $R_a=0,98\mu\text{m}$, а измерената микротвърдост е от 675 до 689HV_{0,2/10}.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ЗА ПРАКТИКАТА

1. Основни изводи от извършената работа при разработване на дисертационния труд „Оптимизиране и изследване на индиректен плазмотрон за химико-термична обработка на титанова сплав Ti-6Al-4V”.

1.1. Разработена е нова модификация на плазмотрон PTN50 за повърхностно плазмено газово азотиране на Ti-6Al-4V, чрез изчисляване на работните параметри и геометричните размери на плазмотрона. В програмния продукт SolidWorks са моделирани три работни конструкции на плазмотрона за индиректно газово азотиране (с един, три и пет отделни волфрамови катода с общо охлаждане).

1.2. Изготвена е конструкторска документация на нова модификация на плазмотрон PTN50, чрез методика за пресмятане на работните параметри, геометричните размери, системата за охлаждане на индиректен плазмотрон за газово азотиране на титан и титанови сплави. Разработен е компютърно-симулационен модел за влиянието на температурата и флуидните потоци върху ресурсните изпитвания на катодния и анодния възел в плазмотрон PTN50.

1.3. Извършени са ресурсни изследвания за определяне ефективността на модифицирания индиректен плазмотрон за плазмено газово азотиране. Установено е, че този с три волфрамови електрода е с най-добри геометрични и технологични показатели. Плазмотрона с три отделни волфрамови електрода показва най-добри ресурсни параметри за 8 часа (загуба на тегло): за катода 0,67 g, а за анода 0,58g, при следните режими: $I=500\text{A}$; $P=35\text{kW}$; $Q/\text{Ar}/\text{N}_2/= 30\text{slpm}$.

1.4. Разработена е методика за изследване на топлопренасянето и топлинните потоци, както и на процесите на напрегнатото и деформираното състояние при плазмено азотирани на Ti- 6Al- 4V.

1.5. Разработени са методики за експериментално-статистическо изследване на взаимовръзката между технологичните параметри на процеса плазмено газово азотиране на образци от Ti-6Al-4V. Получени са регресионите уравнения и е направена оптимизация на процеса. Определено е влиянието на тези параметри върху микротвърдостта на обработените материали и усреднената височина на грапавините (R_z).

1.6. Изследвано е влиянието на режимите при повърхностно газово азотиране с индиректен плазмотрон върху микротвърдостта и грапавостта на реални зъбни импланти и сонотроди за ултразвуково изпитване на умора.

2. Предложения за практиката.

Дисертационният труд е насочен към изследване и развиване на технологичните параметри на процеса плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон PTN50. Направените изследвания по отношение на оптимизиране на технологичните параметри и на качеството на повърхнините след плазмено газово азотиране на реални детайли от титанова сплав Ti – 6Al – 4V, дават основание да смятаме, че:

-разработената конструкция на индиректен плазмотрон PTN50 с три волфрамови електрода е работоспособна и с висока надеждност;

- разработените технологии могат да станат основа за решаването на задачи свързани с намаляване времето на остеоинтеграция на прилаганите в медицината импланти и протези;

-разработените технологии могат да послужат при решаването на други конструкторски и технологични задачи, свързани с повърхностното обработване на титан и титанови сплави.

Настоящата работа се явява един следващ етап от изследванията по проекти:

- ФНИ ДДВУ02/16-2010г. на тема „Създаване и изследване на градиентно структурирани микро и нанослоеви върху титанови и зъбни импланти“.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

Настоящият дисертационен труд представлява завършен етап от теоретично-експериментално изследване на нова модификация плазмотрон РТN50 и процеса на плазмено газово азотиране на образци от Ti-6Al-4V. На основа реализацията на целта и задачите на дисертационната работа и получените резултати могат да бъдат формулирани следните основни приноси:

1. Научно-приложни приноси:

1.1. Предложена е методика за пресмятане на работните параметри, геометричните размери и системата за охлаждане на индиректен плазмотрон за химико-термично азотиране на титан и титанови сплави. На база резултатите от методиката е изготвена конструкторска документация на нова модификация на плазмотрон РТN50, съгласно изискванията на БДС 2.109:1980;

1.2. Предложена е методика за пресмятане на ресурса на работа на основните възли в индиректен плазмотрон РТN50. На базата на методиката е установено, че индиректния плазмотрон с три отделни волфрамови електрода показва най-добри ресурсни параметри, с което се повишава научната и практическата стойност на резултатите от изследването;

1.3. Предложена е методика, за изследване на експериментално-статистически взаимовръзката по отношение на ранжирането и значимостта на факторите (P, t, I, Q). Получени са регресионите уравнения и са уточнени работните режими, удовлетворяващи едновременно изискванията за повишена микротвърдост на обработваната повърхност и усреднената височина на грапавините.

1.4. Предложена е методика и е изследвано влиянието на температурата, термическия цикъл и скоростта на охлаждане при процеса на плазмено газово азотиране върху структурата и качеството на получените азотирани слоеве.

1.5. Разработената технология покрива изискванията на българските и световни стандарти към повърхностна микро твърдост и грапавост на импланти и протези.

1.6. Предложен е компютърно симулационен модел и е изследвано разпределението на температурното поле на азотирани образци от Ti – 6Al – 4V при газоплазмено азотиране с плазмотрон РТN50. Резултатите от симулациите са сравнявани с данни и зависимости, получени в работата от експеримента. Установено е, че разработения модел, адекватно пресъздава процесите на разпределение на топлинното поле в дълбочина на реалния обект.

1.7. Предложен е компютърно симулационен модел и е изследвано напрегнатото и деформираното състояние на изследваните азотирани образци от титанова сплав Ti – 6Al – 4V след газоплазмено азотиране. Модела позволява

прогнозиране появата на дефекти и възникването на остатъчни напрежения и деформации.

2. Приложни приноси:

2.1. Разработена е конструкторска документация на индиректен плазмотрон за плазмено газово азотиране PTN50.

2.2. Изработен е прототип на плазмотрон с три работни конструкции на катодния възел, с един, три и пет волфрамови електрода, с общо водно охлаждане.

2.3. Разработена е и е изследвана технология за повърхностно азотиране на титанови зъбни импланти. Доказано е, че използваната технология за азотиране на детайли с малки размери, например дентални импланти е работоспособна.

Азотирането е проведено при режим:

- Сила на тока, A	450
- Напрежение, V	55
- Разход плазмообразуващ газ:	
- Аргон (Ar), l/min	20
- Азот (N ₂), l/min	4
- разстояние от края на дюзата до образеца, mm	100

2.4. Разработена е и е изследвана технология за повърхностно азотиране на сонотрод от стенд за ултразвуково резонансно изпитване на умора при честота 20kHz. Доказано е, че използваната технология за азотиране е работоспособна.

Азотирането е проведено при режим:

- Сила на тока, A	500
- Напрежение, V	70
- Разход плазмообразуващ газ:	
- Аргон (Ar), l/min	30
- Азот (N ₂), l/min	6
- Разстояние от края на дюзата до образеца, mm	120
- Обороти на въртене на детайла 320 min ⁻¹ ,	
- Движение на плазмотрона- възвратно постъпателно 1,44 mm/min;	
- Време за азотиране на прехода 2 min	

2.5. Демонстрирания метод за 3D моделиране на процесите на топлопренасяне и оценка на напрегнатото състояние след газоплазмено азотиране с индиректен плазмотрон PTN50 на образци от титанова сплав от Ti – 6Al – 4V има универсален характер. Използването на продукт като SolidWorks дава възможност за експериментиране на различни повърхностни технологии, като се варира с изходните параметри на режимите или използване на различни материали.

3. Заключение.

Дисертационният труд е насочен към изследване и развиване на технологичните параметри на процеса плазмено газово азотиране. Направените изследвания по отношение на оптимизиране конструктивните и технологичните параметри и изследване на качеството на повърхнините след плазмено газово азотиране, дават възможност да се уточняват експлоатационните свойства на азотираните титанови изделия и могат да станат основа за решаването на други конкретни задачи в тази област. Методите и технологиите за повърхностно уякчаване непрекъснато се развиват и ще продължават да се развиват, като при това в тях намират приложение най-съвременните постижения на техническите науки и технологии. Настоящата работа се явява един основен етап от изследването на тази специфична област на технологичната дейност у нас.

4. Публикувани работи по темата на дисертацията.

1..Т.Мечкарова, Х.Скулев, К.Йорданов, Влияние на флуидните потоци върху ресурсните изпитвания на катодния и анодния възел в плазмотрон PTN50, НТСМ Научни Известия -1, 2014г., стр.407-411.

2. Т.Мечкарова, Х.Скулев, К.Йорданов, Симуляционно моделиране на температурните полета върху плазмотрон за азотиране., НТСМ Научни Известия -1, 2014г., стр.402-406

3. Х.Скулев, Т.Мечкарова, М.Бакалова, Симуляционно моделиране на процесите на напрегнатото и деформираното състояние при повърхностно газоплазмено азотиране чрез използване на индиректен плазмотрон., Машиностроителна техника и технологии -2, НТС, 2014г., стр.3-7.

4. Х.Скулев, Т.Мечкарова, М.Бакалова, Изследване на толопренасянето е образци от TI-6AL-4V азотирани с индиректен плазмотрон за напластяване., Машиностроителна техника и технологии -2, НТС, 2014г., стр.7-13.

5. Т. Мечкарова, Експериментално-статистическо изследване на оптималните режими на работа при повърхностно газоплазмено азотиране на образци от TI – 6AL – 4V.,“Транспорт, екология – устойчиво развитие”, XX НТК с международно участие, ЕКОВАРНА 2014, 15-17 май 2014г., ISBN 954-20-00030.

6. Т. Мечкарова, Изследване на оптималните режими на работа върху грапавостта на повърхнината., “Транспорт, екология – устойчиво развитие”, XX НТК с международно участие, ЕКОВАРНА 2014, 15-17 май 2014г., ISBN 954-20-00030.

DISERTATION TITLE:
**“ Optimization and study of indirect plasma torch for chemical-thermal treatment
of titanium alloy Ti-6Al-4V”**
AUTOR: Tatyana Mitkova Mechkarova

ANNOTATION

The dissertation is developed computer simulation analysis of the spread heat flows in indirect torch for gas nitriding, using the software SolidWorks. Different methods of using a stream of ionized plasma as a source of energy are applied early 50s of last century, but only in recent years, they are widely used in chemical heat metal processing. The process is based on the ionization of different gases by an electric arc and plasma jet Focus on the product developed through a special nozzle design of the torch indirect.

During recent years research in the area of application of low-temperature plasma in chemical engineering, metallurgy, machine-building and a number of other branches of industry is underway in the technically developed countries. The use of the research results allows to substantially intensify the existing technological processes and create entirely new materials, technologies and equipment in production.

One of the new highly productive methods for hardening a titanium surface is the plasma nitriding with indirect plasma torch.

Analysis of the factors influencing the spatial stabilization of the arc and the erosion of the nozzle node in indirect Plasma torch for chemical and thermal treatment shows that significant influence, unless the technological parameters of the regime, has the type and geometry of the nozzle node. In order to reduce the volume and the amplitude of a large-scale shunt create a computer simulation model describing the thermal load on the main nodes of indirect plasma torch in plasma nitriding of titanium alloys. The results of the modeling are compared with the results of experiments conducted to determine the level of erosion of the cathode and anode nodes.