



ВВМУ „НИКОЛА ЙОНКОВ ВАПЦАРОВ”

ФАКУЛТЕТ „ИНЖЕНЕРЕН”

Катедра „Кораборемонт”

МОМЧИЛ ГАЛИНОВ МАНОВ

**ИЗСЛЕДВАНЕ ПРОЦЕСА НА ПЛАЗМЕНО АЗОТИРАНЕ НА
ТИТАНОВИ СПЛАВИ С ИНДИРЕКТЕН ПЛАЗМОТРОН**

Професионално направление: „Транспорт, корабоплаване и
авиация”

АВТОРЕФЕРАТ

НА

ДИСЕРТАЦИОНЕН ТРУД

за придобиване на образователната и научна степен

„ДОКТОР”

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Христо Костов Скулев

Варна, 2013г.

Дисертантът работи във ВВМУ „Н. Й. Вапцаров” и е в свободна форма на обучение в катедра ”Кораборемонт” при факултет „Инженерен”.

Изследванията от дисертационният труд са извършени във ВВМУ „Н. Й. Вапцаров”, Технически университет – Варна и технологичната база на фирма „Плазма” - ЕООД.

Дисертационният труд е насочен за защита от факултет „Инженерен” при ВВМУ „Н. Й. Вапцаров” в съответствие на чл. 5, ал. 1 от ЗРАС.

Автор: Момчил Галинов Манов

Заглавие: Изследване процеса на плазмено азотиране на титанови сплави с индиректен плазмотрон

Тираж: 15 броя

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема.

Конструкционните материали, които се използват в корабостроенето трябва да притежават оптимална комбинация от добра корозионна устойчивост и механична надеждност, отлични якостни характеристики, добра обработваемост, ниска цена и да изискват минимална степен на поддръжка. Титанът и неговите сплави осигуряват отлична комбинация от тези изисквания, като едно от основните препятствия за приложението им в корабостроенето е наложилата се остаряла концепция, че това са скъпи и екзотични материали със сложни технологии за обработка.

Наред с многото си предимства титановите сплави се характеризират с лоши трибологични свойства при плъзгащ контакт, висок и нестабилен коефициент на триене и силна склонност към задиране. В отговор на това възникват различни методи за модифициране на повърхностния слой на титана и неговите сплави и разширяване сферите на тяхното приложение.

Плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон е нов и перспективен метод за промяна свойствата на повърхностния слой на титановите сплави. С използването на този метод на азотиране значително се скъсява времето за протичането му, като същевременно се създава възможност за локално обработване на различни възли и детайли. Изнесените в литературата данни са недостатъчни и често пъти противоречиви по отношение на структурата и механичните свойства на повърхностния слой на титановите сплави след плазмено азотиране.

Цел на изследването.

Целта на изследването е адаптиране на плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон за използването му при възстановяване на детайли от титанови сплави от корабните машини и механизми.

Поставената в дисертационния труд цел може да бъде решена чрез изпълнението на следните основни задачи:

1. Изследване влиянието на плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон върху структурата и свойствата на най-често използваните в корабостроенето титанови сплави Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-10V-2Fe-3Al, и Ti-6Al-4V;

2. Изследване на корозионната устойчивост на титанови сплави Ti-8Al-1Mo-1V и Ti-6Al-4V след плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон;

3. Оптимизиране на процеса плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон и определяне на влиянието му върху якостните и деформационните характеристики на титановите сплави.

4. Приложение на оптимизирания метод на плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон върху реални детайли от корабните машини и механизми.

Средства и място на изследването.

За разработването на дисертационният труд и реализирането на поставените основни задачи са използвани теоретични, изследователски и експериментално - емпирични средства. Те включват съвременни програми за текстообработка и графичен дизайн (Microsoft office, CorelDRAW Graphics Suite, Adobe Photoshop), системи и технологии за модифициране на повърхности чрез плазмена химико-термична обработка.

За място на провеждане на експериментите се използваха базите на ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Технически Университет - Варна и технологичната база на фирма „Плазма“ - ЕООД.

Практическа ценност на изследването.

Определен е технологичен режим за локално плазмено газово азотиране на детайли от титанова сплав Ti-6Al-4V с използване на апаратура тип APN-50, окомплектована с индиректен плазмотрон PN50. Този технологичен режим е използван при възстановяване на вал от центробежна помпа Grundfos CRT от титанова сплав Ti-6Al-4V.

Публикации по дисертационния труд.

По темата на дисертационния са публикувани 5 научни статии, рецензирани и отпечатани в национални научни списания. Списъкът на публикациите по дисертационния труд е даден в края на автореферата.

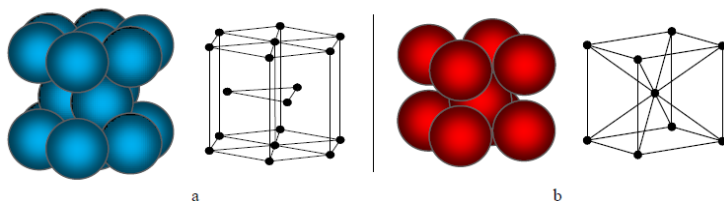
КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Въведение.

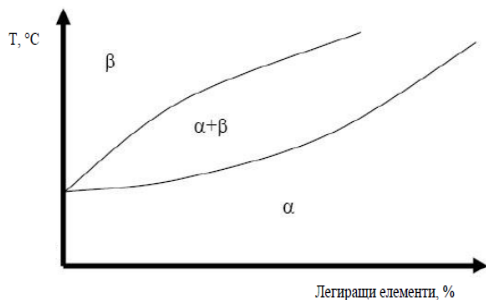
Във въведението са посочени тенденциите в използването на титановите сплави на съвременните кораби, основните проблеми при разширяване на приложението им, като е дефинирана актуалността на темата на дисертационен труд.

Глава I. Литературен обзор.

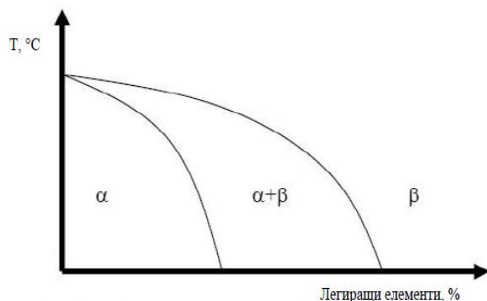
Разгледани са основните свойства и характеристики на титана и неговите сплави. Установено е влиянието на α и β стабилизиращите елементи върху структурата, свойствата и температурата на полиморфно превръщане (Фиг. 1, 2-а и 2-б).



Фиг. 1 Основни кристални структури на титана: а-хексагонална α фаза, б-кубична обемно центрирана на β фаза [134]

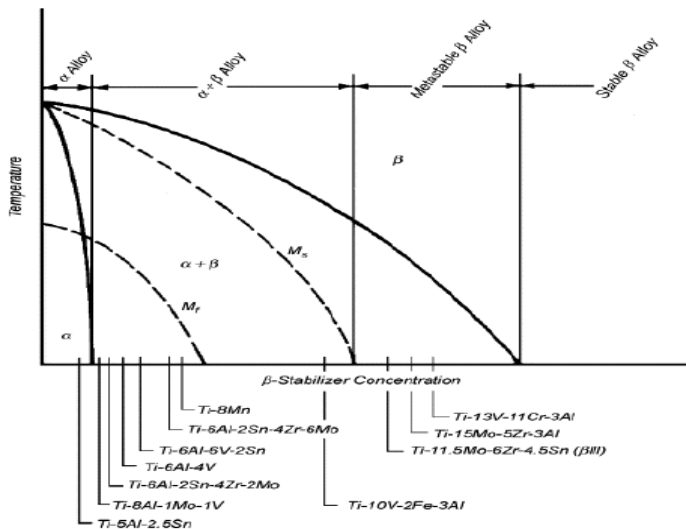


Фиг. 2-а Използване на α стабилизатори в сплавите на титана [133]



Фиг. 2-б Използване на β стабилизатори в сплавите на титана [133]

В резултат на подробно проучване е установено, че в съвременното карабостроене и машиностроене основно се използват супер α сплавите Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo и Ti-6Al-4V и $\alpha+\beta$ Ti-10V-2Fe-3Al (Фиг. 3).



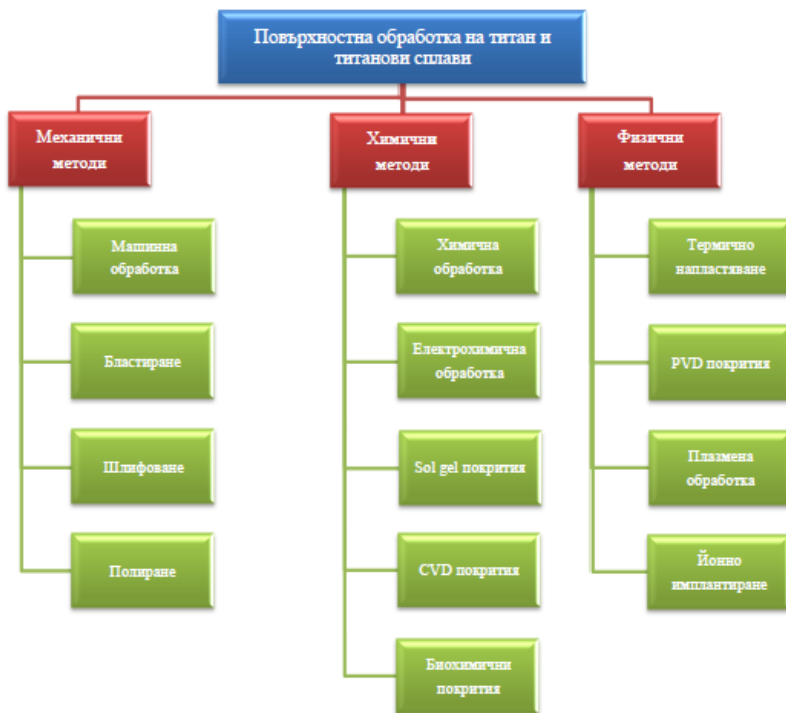
Фиг. 3 Класификация на α , β и $\alpha+\beta$ сплавите на титана [142]

Основни предимства на титановите сплави са:

- отлична корозионна устойчивост в среда от морска вода;
- не токсични към човека и околната среда;
- отлични якостни характеристики;
- конструкционна здравина;
- не магнитни;
- добро формообразуване и заваряване;
- добри леярски свойства и добра обработваемост чрез пластична деформация.

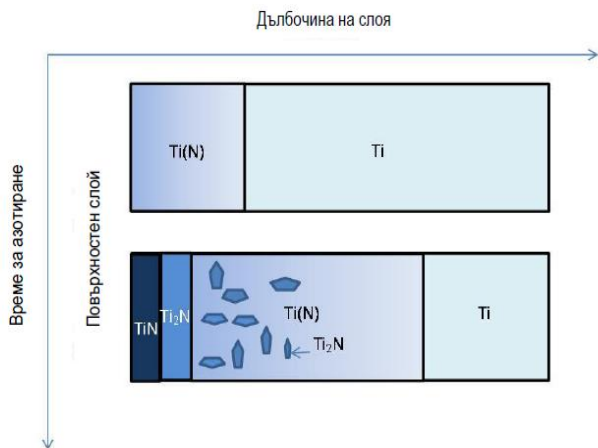
Ниската повърхностна твърдост и лошите трибологични свойства ограничават използването на титановите сплави при изработване на детайли, работещи в условия на триене и контактни натоварвания. В отговор на това развитието на технологиите за повърхностно модифициране на металите и сплавите позволява

внедряване на нови съвременни методи за получаване на модифицирани повърхностни слоеве с уникални свойства и отстраняване на тези недостатъци (Фиг. 5).



Фиг. 5 Методи за повърхностна обработка на титан и титанови сплави

В сферата корабостроенето и машиностроенето, като способ за повърхностно модифициране на титан и титаново сплави се използва химико-термичната обработка. Основен метод в това направление е азотирането. В тази връзка е разгледано протичането на дифузионните процеси при химико-термична обработка на титан и титанови сплави и основните промени, които настъпват в повърхностния слой при азотиране (Фиг. 8).



Фиг. 8 Принцилна схема на процесите на азотиране на титан и титанови сплави [17]

Основните методи за азотиране на титан и титанови сплави са:

- газово азотиране;
- азотиране в разтопени соли;
- плазмено азотиране;
- лазерно азотиране;
- йонно имплантиране;
- плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон.

Недостатък на традиционните методи за азотиране е високата работна температура ($650\div 1000^{\circ}\text{C}$) и продължителното време (до 100 часа) на протичането им. Тези недостатъци се отстраняват успешно с използване на съвременни методи, като плазменото и йонното азотиране. Те протичат при по-ниски температури ($400\div 950^{\circ}\text{C}$) за значително по-кратко време ($0,5\div 32$ часа), като дълбочината на азотирания слой достига $400\mu\text{m}$ при плазменото и едва $50\mu\text{m}$ при йонното азотиране. Твърдостта на повърхностния азотиран слой и при двата метода е в границите $800\div 1200\text{HV}$.

Анализът на разгледаните методи за азотиране показва, че плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон в сравнение

с останалите разгледани методи за азотиране на титан и титанови сплави, има следните важни предимства:

- Ниска себестойност дължаща се на:
 - от 30 до 100 пъти по-кратко време за азотиране;
 - от 100% до 150% по-малко консумирана енергия;
 - от 100 до 200 пъти по-малко потребление на работен газ.
- В процесът на азотиране с индиректен плазмотрон обекта е електронеутрален.
- Създава се възможност за локално азотиране на обекта с използване на разнообразни схемни решения за плазмена обработка.
- Процесът плазмено азотиране не изисква извършване на допълнителни манипулации по повърхностния слой.
- Отлична хигиена и работни условия - процесът не е токсичен и отговаря на всички модерни изисквания за опазване на здравето и околната среда.

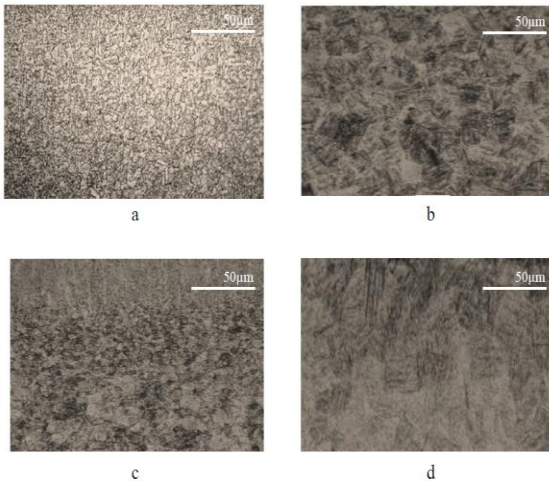
Глава II. Методика на научното изследване.

Методиките за изследване на титановите сплави, описани в глава II са стандартни. Те включват методика за изработване на образци, методики за провеждане на механични изпитвания, методики за извършване на микроструктурен анализ, апаратурата и началните условия на провеждане на експериментите в дисертационната работа.

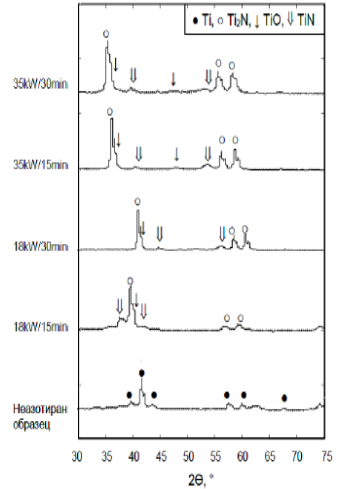
Глава III. Изследване влиянието на плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон върху структурата и свойствата на титана и титанови сплави Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-10V-2Fe-3Al, и Ti-6Al-4V.

Целта на експеримента е определяне влиянието на плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон върху структурата и свойствата на титана и едни от най-широко използваните негови сплави.

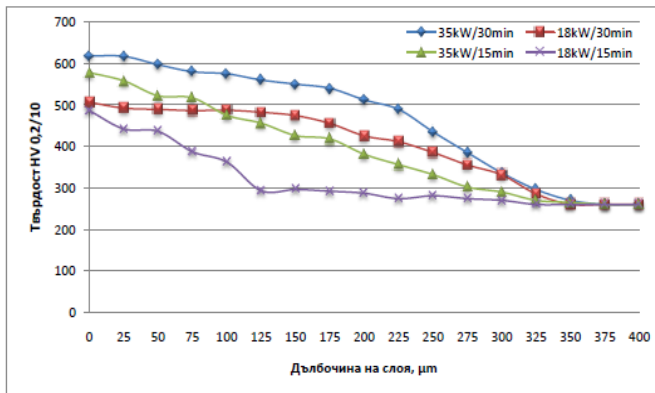
По време на проведеното плазмено газово азотиране повърхностния слой на образците се променя цветово. Този слой има червен цвят след петнадесет минутно плазмено азотиране с мощност 35kW. Цвета се променя от червен до златисто жълт с увеличаване на времето за азотиране от 15 на 30min при същата мощност, което се дължи на формирането на титанови нитриди на повърхността. При всички образци се разграничават три зони, формирани по време на азотиране – смесена зона, дифузионна зона и основа. Микроструктурата е хомогенна за образци, азотирани с мощност 18kW и не хомогенна при режимите на азотиране с мощност 35kW. Рентгено-фазовия анализ показва наличие на твърд разтвор α -Ti(N), TiN и TiO₂. Микротвърдостта на титана и неговите сплави след азотиране се изменя в границите 656÷882HV_{0,2/10}. Най-високи стойности се наблюдават при сплавите Ti-8Al-1Mo-1V и Ti-6Al-4V, съответно 821 и 882HV_{0,2/10} с режим на азотиране 35kW за време 30min. Дълбочината на азотирания слой нараства с нарастване на мощността и времето за азотиране.



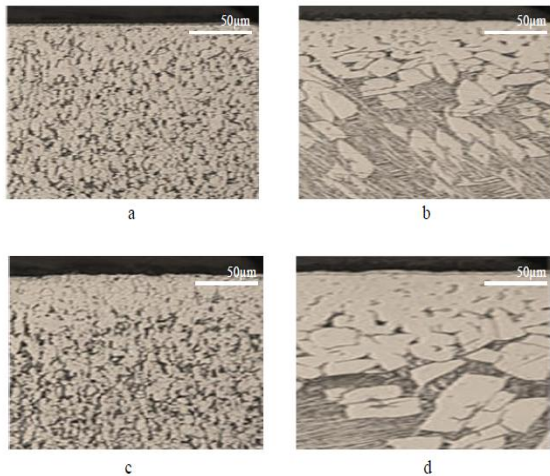
Фиг. 25 Образци от Ti с режими на азотиране 18kW за време 15min (a), 35kW за време 15min (b), 18kW за време 30min (c) и 35kW за време 30min (d)



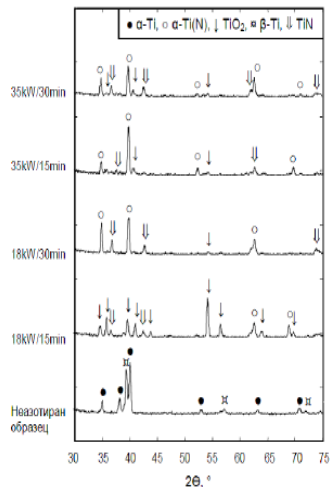
Фиг. 30 Рентгено-фазов анализ на образци от титан с различни режими на азотиране



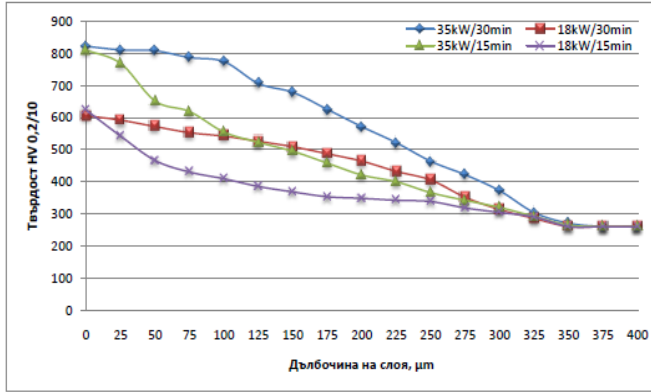
Фиг. 35 Изменение на микротвърдостта на образци от титан азотиранни при различни режими с индиректен плазмотрон



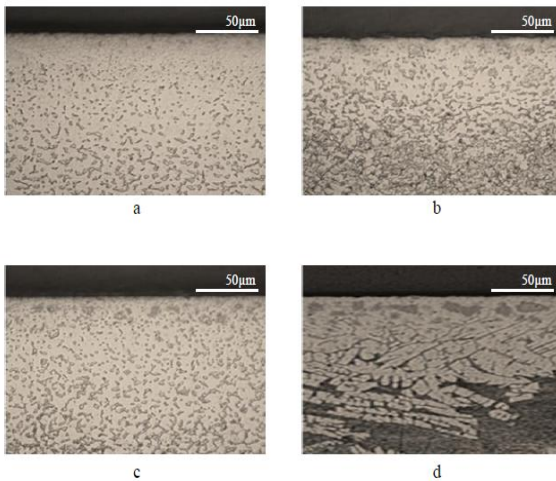
Фиг. 26 Образци от Ti-8Al-1Mo-1V с режими на азотиране 18kW за време 15min (a), 35kW за време 15min (b), 18kW за време 30min (c) и 35kW за време



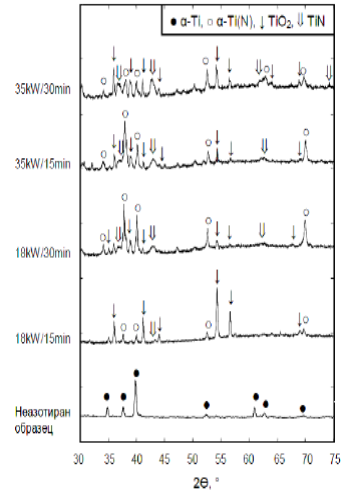
Фиг. 31 Рентгено-фазов анализ на образци от Ti-8Al-1Mo-1V с различни режими на азотиране



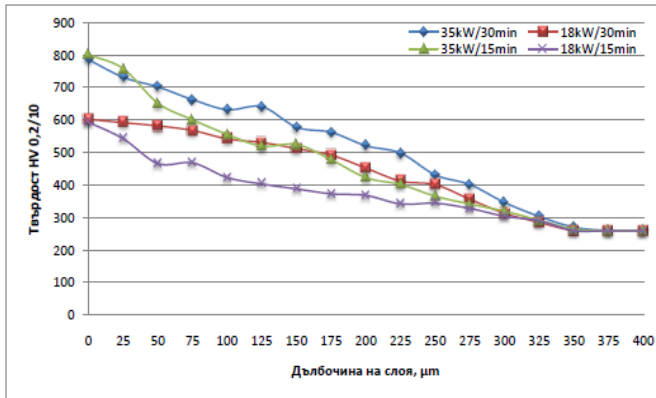
Фиг. 36 Изменение на микротвърдостта на образци от Ti-8Al-1Mo-1V азотиранни при различни режими с индиректен плазмотрон



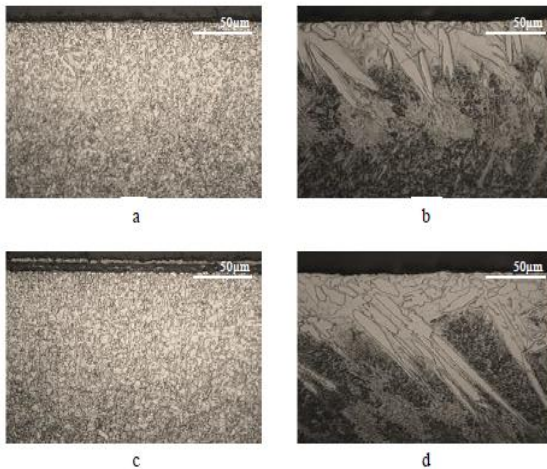
Фиг. 27 Образци от Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo с режими на азотиране 18kW за време 15min (a), 35kW за време 15min (b), 18kW за време 30min (c) и 35kW за



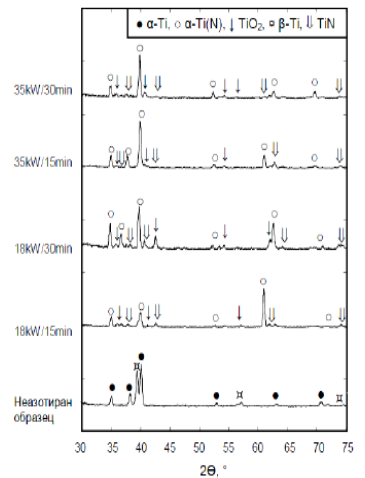
Фиг. 32 Рентгено-фазов анализ на образци от Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo с различни режими на азотиране



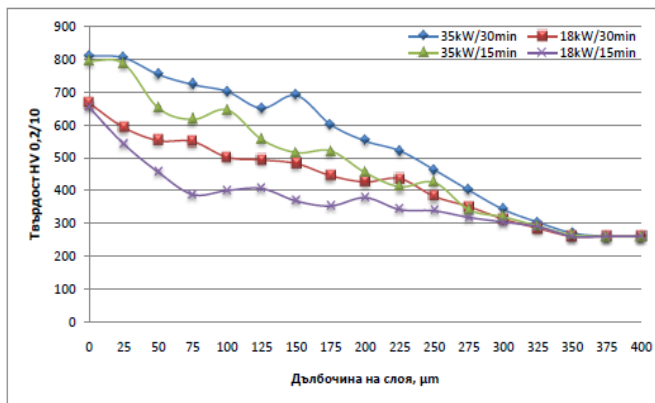
Фиг. 37 Изменение на микротвърдостта на образци от Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo азотиранни при различни режими с индиректен плазмотрон



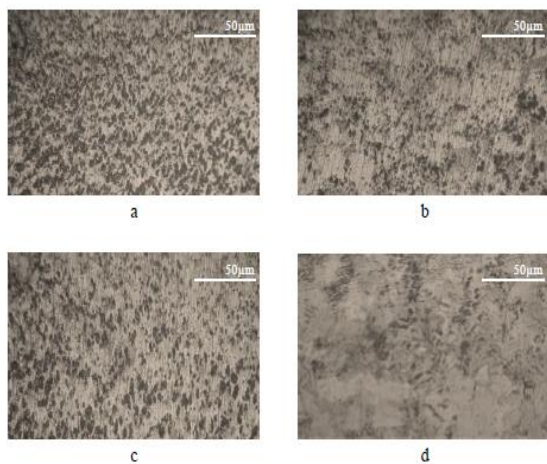
Фиг. 28 Образци от Ti-10V-2Fe-3Al с режими на азотиране 18kW за време 15min (a), 35kW за време 15min (b), 18kW за време 30min (c) и 35kW за време



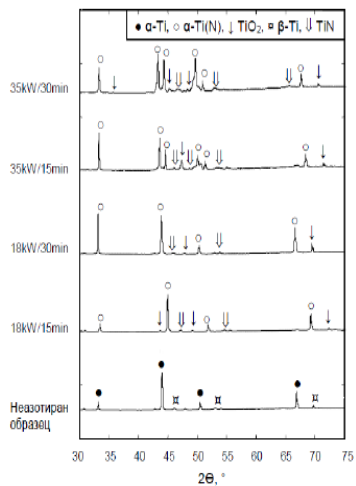
Фиг. 33 Рентгено-фазов анализ на образци от Ti-10V-2Fe-3Al с различни режими на азотиране



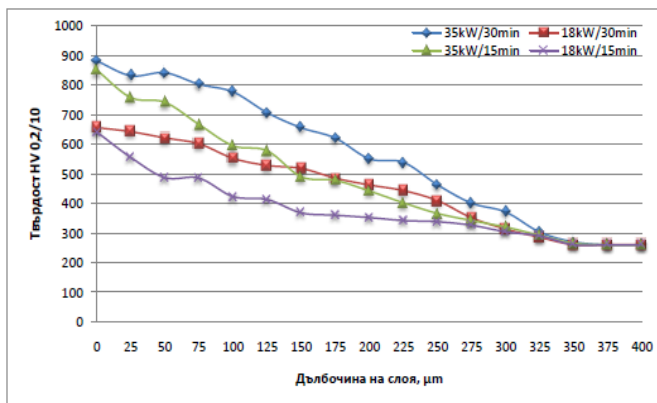
Фиг. 38 Изменение на микротвърдостта на образци от 10V-2Fe-3Al азотиранни при различни режими с индиректен плазмотрон



Фиг. 29 Образци от Ti-6Al-4V с режими на азотиране 18kW за време 15min (а), 35kW за време 15min (b), 18kW за време 30min (с) и 35kW за време 30min



Фиг. 34 Рентгено-фазов анализ на образци от Ti-6Al-4V с различни режими на азотиране



Фиг. 39 Изменение на микротвърдостта на образци от Ti-6Al-4V азотиранни при различни режими с индиректен плазмотрон

Глава IV. Използване на плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон при ремонтно-възстановителни процедури.

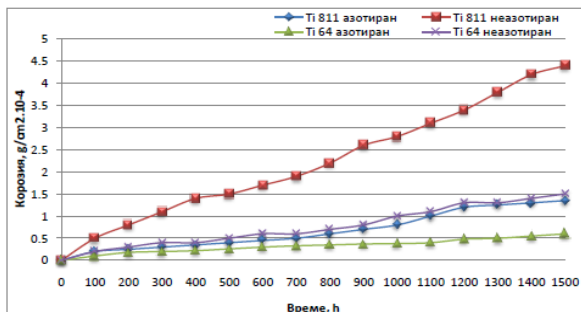
Високата корозионна устойчивост на титановите сплави ги прави особено подходящи за изработка на различни системи от корабните машини и механизми, работещи в условия на контактни натоварвания и разнообразни агресивни среди. В тази връзка на база на подробни проучвания и сведения, получени от водещи фирми производители се установи, че основно в това направление се използват титанови сплави Ti-8Al-1Mo-1V и Ti-6Al-4V.

Целта на изследванията е да се създадат условия за използване на плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон при възстановяване на детайли, изработени от титанови сплави Ti-8Al-1Mo-1V и Ti-6Al-4V.

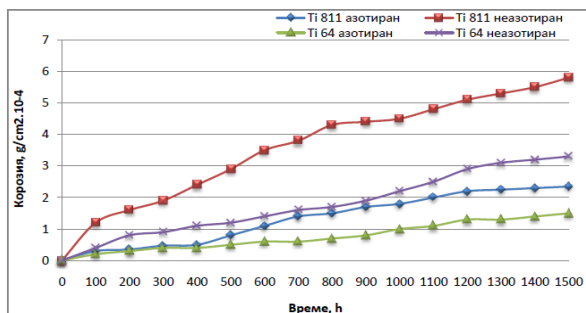
1. Изследване на корозионната устойчивост на титанови сплави Ti-8Al-1Mo-1V и Ti-6Al-4V след плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон.

Азотирането е проведено на 12 образци – 6 броя от Ti-8Al-1Mo-1V и 6 броя от Ti-6Al-4V.

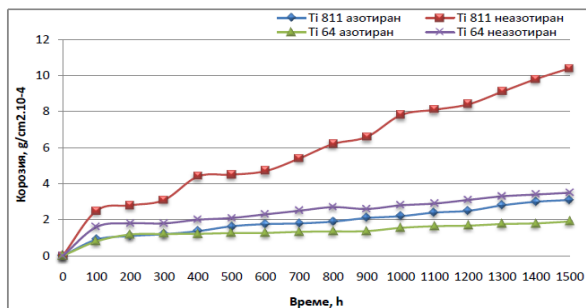
Образците са азотирани без претапяне на повърхностния слой при мощност на плазмотрона 20kW за време 15min.



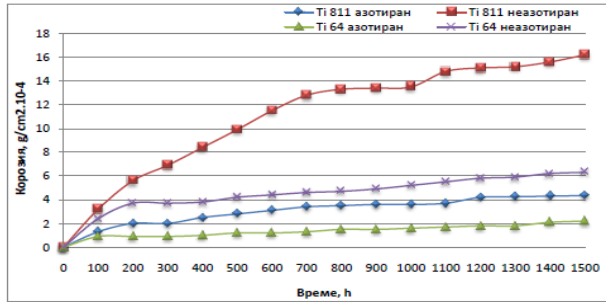
Фиг. 40 Резултати за корозионна устойчивост на не азотирани и плазмено газово азотирани образци от Ti-8Al-1Mo-1V и Ti-6Al-4V в корозионна среда от NaCl при температура 40°C



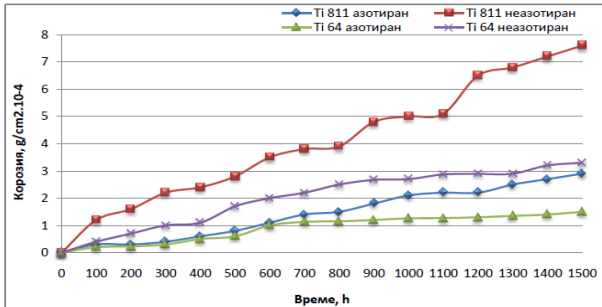
Фиг. 41 Резултати за корозионна устойчивост на не азотирани и плазмено газово азотирани образци от Ti-8Al-1Mo-1V и Ti-6Al-4V в корозионна среда от NaCl при температура 80°C



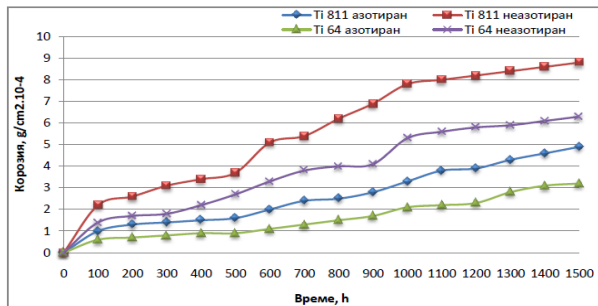
Фиг. 42 Резултати за корозионна устойчивост на не азотирани и плазмено газово азотирани образци от Ti-8Al-1Mo-1V и Ti-6Al-4V в корозионна среда от HCl при температура 40°C



Фиг. 43 Резултати за корозионна устойчивост на не азотиран и плазмено газово азотиран образци от Ti-8Al-1Mo-1V и Ti-6Al-4V в корозионна среда от HCl при температура 80°C



Фиг. 44 Резултати за корозионна устойчивост на не азотиран и плазмено газово азотиран образци от Ti-8Al-1Mo-1V и Ti-6Al-4V в корозионна среда от H₂SO₄ при температура 40°C



Фиг. 45 Резултати за корозионна устойчивост на не азотиран и плазмено газово азотиран образци от Ti-8Al-1Mo-1V и Ti-6Al-4V в корозионна среда от H₂SO₄ при температура 80°C

Резултатите показват, че плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон оказва съществено влияние върху корозионната устойчивост на титанови сплави Ti-8Al-1Mo-1V и Ti-6Al-4V в агресивни среди NaCl, HCl и H₂SO₄ и температури на изпитване 40 и 80°C (Фиг. 40, 41, 42, 43, 44 и 45).

Таблица 6 Резултати от изследване на корозионната устойчивост на Ti-6Al-4V и Ti-8Al-1Mo-1V в среди от NaCl, HCl и H ₂ SO ₄ при температури 40 и 80°C						
Корозионна среда	NaCl		HCl		H ₂ SO ₄	
Температура	40°C	80°C	40°C	80°C	40°C	80°C
Ti-6Al-4V	Тегловни загуби (g/cm ²)					
Азотиран	0,6.10 ⁻⁴	1,4.10 ⁻⁴	1,4.10 ⁻⁴	2,1.10 ⁻⁴	1,5.10 ⁻⁴	3,1.10 ⁻⁴
Не азотиран	1,5.10 ⁻⁴	3,2.10 ⁻⁴	3,3.10 ⁻⁴	6,4.10 ⁻⁴	3,2.10 ⁻⁴	6,3.10 ⁻⁴
Ti-8Al-1Mo-1V	Тегловни загуби (g/cm ²)					
Азотиран	1,4.10 ⁻⁴	2,3.10 ⁻⁴	2,2.10 ⁻⁴	4,3.10 ⁻⁴	2,9.10 ⁻⁴	4,9.10 ⁻⁴
Не азотиран	4,4.10 ⁻⁴	5,8.10 ⁻⁴	10,3.10 ⁻⁴	16,1.10 ⁻⁴	7,5.10 ⁻⁴	8,8.10 ⁻⁴

Най-високи тегловни загуби (16,1.10⁻⁴g/cm²) са регистрирани при използване на агресивна среда HCl с температура 80°C при не азотирания образец от сплав Ti-8Al-1Mo-1V, а най-ниски при азотирания образец от сплав Ti-6Al-4V (0,6.10⁻⁴g/cm²) с използване на агресивна среда NaCl при температура 40°C. Данните в таблица 6 показват, че тегловните загуби на титанова сплав Ti-8Al-1Mo-1V надвишават от два до три пъти тези на Ti-6Al-4V и за трите използвани агресивни среди.

2. Адаптиране на метода плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон за възстановяване на валове на помпени агрегати от титанова сплав Ti-6Al-4V.

Създадени са условия за реално използване на плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон при възстановяване на вал от центробежна помпа Grundfos CRT от система морска вода на танкер с водоизместване 150000DWT, собственост на компания „Columbia Shipmanagement“, Република Кипър. С помощта на електроискров анализ е установено, че вала е изработен от титанова сплав Ti-6Al-4V.

Отчитайки реалните експлоатационни условия, малките габарити на детайла и необходимостта от провеждане на локално възстановяване се проведе експеримент за адаптиране на процеса плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон.

Основният мотив при избора на стойностите е провеждане на плазменото азотиране за кратко време с цел минимизиране на негативното влияние на температурата на плазмената струя при локално азотиране на сектори от вала върху механичните му свойства и понижаване разхода на ресурси.

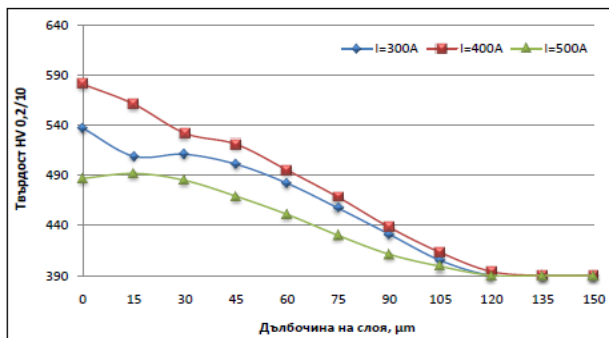
Процесът на азотиране се осъществява с индиректен плазмотрон PN50 при сила на тока 300, 400 и 500А, разход на допълнителен плазмо-образуващ газ азот 2, 4 и 6l/min и време за азотиране 1, 2 и 3min, напрежение на плазмотрона е 60V, разход на основен плазмо-образуващ газ Ar - 20l/min и разстояние от края на дюзата до образеца 100mm.

Резултатите от проведеният микроструктурен анализ на азотираните образци от Ti-6Al-4V показват, че независимо от значително по-краткото време, за което протича процеса азотиране, микроструктурата на образците е хомогенна и е сходна с тази от проведения експеримент в глава 3 от дисертационната работа.

Измерената дълбочина на получения азотиран слой зависи от режима на работа на плазмотрона и се изменя в границите 90÷122µm.

➤ Изследване влиянието на силата на тока върху микротвърдостта след плазмено газово азотиране.

От показаните графични зависимости може се установи, че при изменение силата на тока на плазмотрона в граници 300÷500А за микротвърдостта се получават средни стойности 487÷581HV_{0,2/10}.

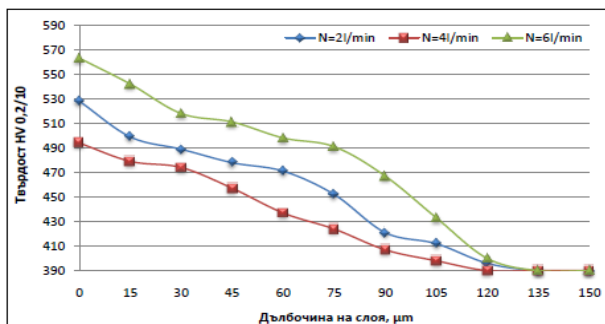


Фиг. 50 Влияние на силата на тока върху микротвърдостта на Ti-6Al-4V

Най-голямо влияние върху микротвърдостта оказва режим на азотиране при сила на тока 400A. При този режим на азотиране стойностите на микротвърдостта достигат 693HV_{0,2/10}. Най-слабо влияние върху микротвърдостта оказва режим на азотиране при сила на тока 500A (Фиг. 50).

➤ Изследване влиянието на количеството изразходван плазмо-образуващ газ азот върху микротвърдостта на Ti-6Al-4V.

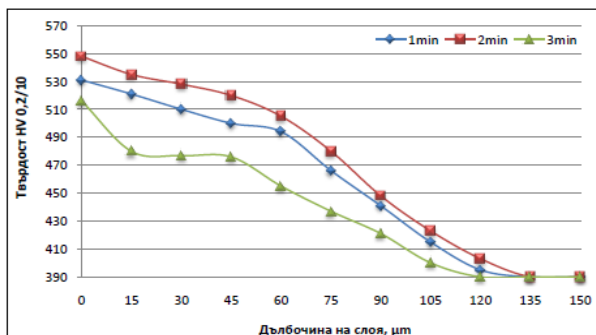
Най-голямо влияние върху микротвърдостта на образците оказва режим на азотиране при разход на плазмо-образуващ газ азот 6l/min (Фиг. 51). При него тя достига стойности 700HV_{0,2/10}. При останалите два режима на азотиране микротвърдостта на образците е по-ниска, като най-слабо влияние оказва режим на азотиране при разход на плазмо-образуващ газ азот 4l/min (494HV_{0,2/10}).



Фиг. 51 Влияние на разхода на плазмо-образуващ газ азот върху микротвърдостта на Ti-6Al-4V

➤ Изследване влиянието на времето за азотиране върху микротвърдостта на образците.

Получените резултати за влияние на времето за азотиране в интервала от 1 до 3min показват, че средните стойности на микротвърдостта за изследвания времеви диапазон е в границите от 516 до 548HV_{0,2/10}. Най-високи стойности за микротвърдостта (693HV_{0,2/10}) за сплав Ti-6Al-4V са регистрирани за време 2min. С увеличаване на времето за азотиране от 2 на 3min стойностите на микротвърдостта се понижават (Фиг. 52).



Фиг. 52 Влияние на времето за азотиране върху микротвърдостта на Ti-6Al-4V

➤ Определяне на оптимални входни параметри за плазмено газово азотиране на вал от помпа Grundfos CRT, изработен от титанова сплав Ti-6Al-4V.

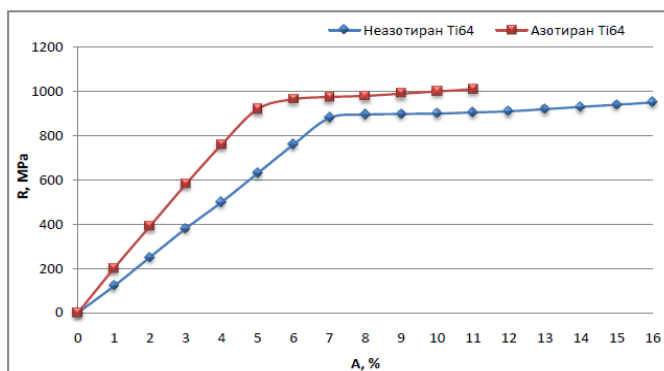
Оптимизирането на входните параметри на процеса плазмено азотиране е насочено към адаптиране на метода за възстановяване на вал от помпа Grundfos CRT.

Получените резултати и направеният анализ показват, че оптимален режим за плазмено газово азотиране на вал от помпа Grundfos CRT, изработен от титанова сплав Ti-6Al-4V може да се реализира при следните входни параметри:

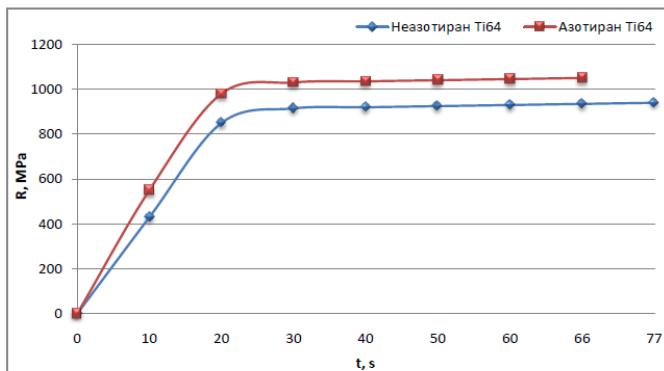
1. Сила на тока (A) - 400;
2. Напрежение на плазмотрон PN50 (V) - 60;
3. Разход на основен плазмо-образуващ газ Ar (l/min) - 20;
4. Разход на допълнителен плазмо-образуващ газ N₂ (l/min) - 6 с чистота 99,998%;
5. Разстояние от края на дюзата до детайла (mm) - 100;
6. Време за азотиране (min) - 2.

3. Определяне влиянието на плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон върху якостните и деформационните характеристики на детайли тип вал от титанова сплав Ti-6Al-4V.

Изискванията на фирмата производител към вала на помпа Grundfos CRT по отношение на якостните и деформационните характеристики са $A > 9\%$, $Z > 12\%$, $R_e > 850\text{MPa}$ и $R_m > 950\text{MPa}$. Целта на експеримента е да се установи влиянието на процеса плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон при избраните начални условия върху якостните и деформационните характеристики на пробни тела от титанова сплав Ti-6Al-4V.



Фиг. 53 Диаграма на напрежение – деформация за изпитаните не азотиран и азотиран образец от Ti-6Al-4V



Фиг. 54 Диаграма на напрежение – време за изпитаните не азотиран и азотиран образец от Ti-6Al-4V

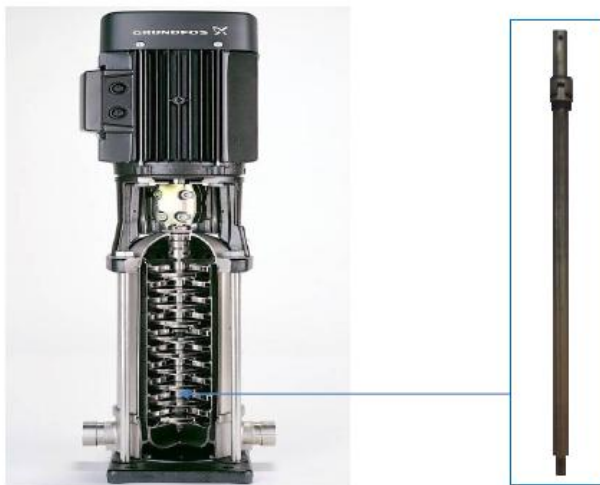
Режимът на азотиране оказва влияние както върху якостните, така и върху деформационните характеристики на Ti-6Al-4V (Фиг. 53, 54 и таблица 10), като Z и A се понижават съответно с 9% и 5%, а R_m и R_e се повишават съответно с 60MPa и 40MPa.

Таблица 10 Резултати от изпитването на опън на образците от Ti-6Al-4V												
Образец	d_0 , mm	L_0 , mm	S_0 , mm ²	d_b , mm	L_b , mm	S_u , mm ²	F_e , N	F_m , N	R_e , MPa	R_m , MPa	A , %	Z , %
Ti-6Al-4V азотиран	10	130	78,5	9,2	145	66,4	61100	67100	920	1010	11	15
Ti-6Al-4V не азотиран	10	130	78,5	8,7	151	59,4	52200	56400	880	950	16	24

4. Възстановяване на вал от центробежна помпа Grundfos CRT с използване на плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон.

Grundfos CRT е центробежна, многостъпална, вертикална, секционна помпа с едностранно втичане на течността. Този тип помпи е предназначен за транспортиране на морска вода и нефтопродукти. Смукателната и нагнетателната област на помпата

са насочени хоризонтално, перпендикулярно на оста на въртене. Общият вид на помпата и вала са показани на фигура 57.



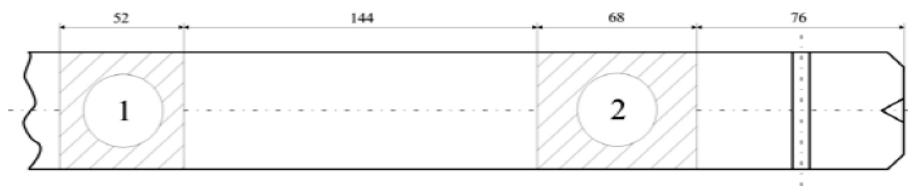
Фиг. 57 Общ вид и вал на центробежна помпа Grundfos CRT

Съгласно инструкцията за експлоатация на фирмата производител тези помпи задължително се разглобяват и дефектират веднъж на три години.

По данни, предоставени от корабособственика центробежна помпа Grundfos CRT е експлоатирана продължително време при ниски температури и наличие на абразивни частици в морската вода. В следствие на това в участъците от цилиндричната част на вала, работещи в условията на плъзгащ контакт (в областта на плъзгащия лагер и механичното уплътнение) са възникнали надир и износване, довели до изменение на геометрична форма по-големи от допустимите (таблица 12, фигура 58). Дълбочината на надирите е установена с използване на копиращ дефекта пластир на фирма Sifco ASC. Измерванията показват, че най-голямата им установена дълбочина е 0,25mm. Установяването на възникнали пукнатини по вала на помпата е осъществено с използване на

визуална дефектоскопия с цветен пенетрант на фирма Diffu-therm. Пукнатини по вала на помпата не бяха констатирани.

Таблица 12 Технически изисквания към вала на помпа Grundfos CRT	
Сплав	Ti-6Al-4V
Дължина на детайла	1202mm
Номинален диаметър	$66_{-0,06}^{+0,02}$ mm
Допустима овалност	0,06mm
Допустима конусообразност	0,04mm
Първи ремонтен размер	$65,50_{-0,06}^{+0,02}$ mm
Втори ремонтен размер	$65_{-0,06}^{+0,02}$ mm
Твърдост на повърхностния слой	670HV0,2/10
Допустима грапавост R_a	0,5 μ m



Фиг. 58 Скица на участъците от вала на центробежна помпа Grundfos CRT, подлежащи на ремонтно-възстановителни процедури:

1- Участък на плъзгаш лагер; 2 - Участък на механично уплътнение.

Установените дефекти са отстранени чрез механична обработка (шлифование). След извършеното шлифование до първи ремонтен размер, диаметъра на вала е $65,50_{-0,05}^{+0,03}$ mm. Тази стойност съответства на изискванията на фирмата производител (таблица 12).

Измерванията на микротвърдост на вала имат стойности след шлифование 430HV0,2/10, при изискване на фирмата производител 670HV0,2/10 (таблицы 14 и 12).

Грапавостта след шлифование има стойности $R_a=0,61\mu$ m, при изискване максимум 0,50 μ m (таблицы 15 и 12).

Място на измерване, °												
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Твърдост, HV0,2/10												
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

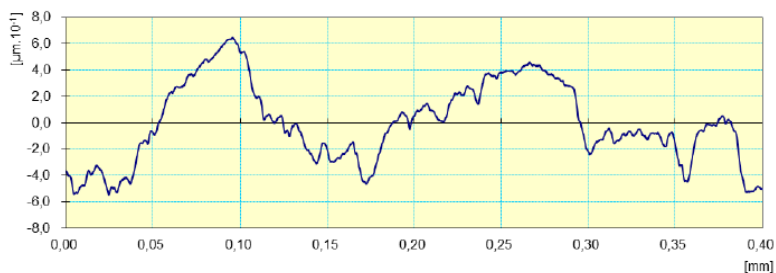
Операция	R _a , μm
Шлифване	0,61
Азотиране	0,82
Полиране	0,38

Възстановяването на износоустойчивия слой на вала на помпата след шлифване се извършва с използване на локално плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон без претапяне на повърхността. Азотирането протича при определения адаптиран режим (таблица 16). То се изпълнява в участъци 1 и 2, съгласно фигура 58.

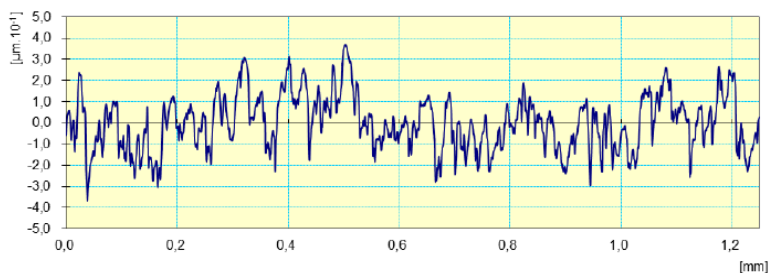
Плазмотрона стартира процеса на азотиране от 10 до 15mm вляво на всеки един от участъците и завършва на 10 до 15mm вдясно на обработвания участък. По този начин се осигурява плавен преход (20÷30mm) между микротвърдостта на изходната след процеса шлифване повърхност и тази, получена след плазмено азотиране.

Таблица 16 Параметри на протичане на процеса плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон		
Параметър	Стойност	Мерна единица
Сила на тока	400±5	A
Напрежение на плазмотрон PN50	60±2	V
Разход на основен плазмо-образуващ газ Ar	20±0,1	l/min
Разход на допълнителен плазмо-образуващ газ N ₂	6±0,1	l/min
Разстояние от края на дюзата до детайла	100±1	mm
Време за азотиране на прехода	2	min
Скорост на плазмотрона	1,44	mm/min

Грапавостта след провеждане на локалното плазмено газово азотиране при възстановяване на вала има стойност $R_a=0,82\mu\text{m}$ (Фиг. 59). За изпълнение на изискванията за грапавост на повърхнината се проведе полиране на азотираните участъци. Полирането се извършва полуавтоматично в условия, определени от фирмата производител с препарат за полиране с едрина на зърното $0,30\mu\text{m}$ и честота на въртене на приспособлението за движение 320min^{-1} . Измерената грапавост след окончателна обработка на вала има стойност $R_a=0,38\mu\text{m}$ (Фиг. 60) а средната микротвърдост на възстановените участъци има стойност 683HV_{0,2/10}.



Фиг. 59 Графични резултати от измерване на грапавост на вал на помпа Grundfos CRT след шлифване



Фиг. 60 Графични резултати от измерване на грапавост на вал на помпа Grundfos CRT след полиране

След извършване на ремонтно-възстановителните процедури и изпълняване на всички изисквания на фирмата производител вала на помпа Grundfos CRT е сяден на корабособственика и същата е въведена в експлоатация.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ ОТ ДИСЕРТАЦИЯТА И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ЗА ПРАКТИКАТА

На база на направените експерименти и анализа на получените резултати могат да се формулират следните основни изводи в дисертационния труд:

1. При плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон PN50 на титана и сплавите Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-10V-2Fe-3Al и Ti-6Al-4V микроструктурата е еднородна и хомогенна при използване на режим на азотиране с мощност на плазмотрона 18kW за време 15 и 30min. С увеличаване на мощността на азотиране на 35kW за време 15 и 30min, микроструктурата се променя към не хомогенна. В процеса на азотиране за всички изследвани сплави се формират и разграничават три зони - смесена, съдържаща фази TiN и TiO₂ или TiN, дифузионна зона от α-Ti(N) и основа, съдържаща изходния състав на сплавта;

2. Режимът на плазмено азотиране с индиректен плазмотрон PN50 оказва влияние върху дълбочината на азотирания слой на титана и титанови сплави Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-10V-2Fe-3Al и Ti-6Al-4V, като при мощности на плазмотрона от 18 до 35kW и време от 15 до 30min, тя се изменя:

- за Ti в граници от 119 до 305μm;
- за Ti-8Al-1Mo-1V в граници от 205 до 315μm;
- за Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo в граници от 220 до 312μm;
- за Ti-10V-2Fe-3Al в граници от 210 до 305μm;
- за Ti-6Al-4V в граници от 270 до 340μm.

3. Плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон PN50 повишава микротвърдостта на титана и сплавите Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-10V-2Fe-3Al и Ti-6Al-4V, като при режим на плазмотрона от 18 до 35kW и време от 15 до 30min, тя се изменя:

- за Ti в граници от 482 до 610HV_{0,2/10};
- за Ti-8Al-1Mo-1V в граници от 622 до 821HV_{0,2/10};

- за Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo в граници от 587 до 805HV_{0,2/10};
- за Ti-10V-2Fe-3Al в граници от 655 до 812HV_{0,2/10};
- за Ti-6Al-4V в граници от 656 до 882HV_{0,2/10}.

4. Плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон PN50 оказва съществено влияние върху корозионната устойчивост на титанови сплави Ti-8Al-1Mo-1V и Ti-6Al-4V при агресивни среди NaCl, HCl и H₂SO₄ и температури на изпитване 40 и 80°C. Най-високи тегловни загуби ($16,1 \cdot 10^{-4} \text{g/cm}^2$) са регистрирани при използване на агресивна среда HCl с температура 80°C при не азотирания образец от сплав Ti-8Al-1Mo-1V, а най-ниски при азотирания образец от сплав Ti-6Al-4V ($0,6 \cdot 10^{-4} \text{g/cm}^2$) с използване на агресивна среда NaCl при температура 40°C.

5. Режимът на плазмено газово азотиране оказва влияние както върху якостните, така и върху деформационните характеристики на Ti-6Al-4V, като Z и A за изследвания режимен диапазон се понижават съответно с 9% и 5%, а R_m и R_e се повишават съответно с 60MPa и 40MPa;

6. Успешно е извършено възстановяване на вал от помпа Grundfos CRT, изработен от титанова сплав Ti-6Al-4V с използване на локално плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон PN50 при следния режим:

1. Сила на тока (A) - 400;
2. Напрежение на плазмотрон PN50 (V) - 60;
3. Разход на основен плазмо-образуващ газ Ar (l/min) - 20;
4. Разход на допълнителен плазмо-образуващ газ N₂ (l/min) - 6 с чистота 99,998%;
5. Разстояние от края на дюзата до детайла (mm) - 100;
6. Време за азотиране (min) - 2.

ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

От извършената работа по дисертационния труд са формулирани следните приноси:

1. Научно-приложни приноси:

1.1 Определено е влиянието на плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон PN50 върху микроструктурата, фазовия състав и механичните свойства на титана и сплавите Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-10V-2Fe-3Al, Ti-6Al-4V.

1.2 Определено е влиянието на плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон PN50 върху корозионната устойчивост на титанови сплави Ti-8Al-1Mo-1V и Ti-6Al-4V в агресивни среди NaCl, HCl и H₂SO₄ при температури на изпитване 40 и 80°C.

1.3 Определено е влиянието на плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон PN50 върху якостните и деформационните характеристики на Ti-6Al-4V.

2. Приложни приноси:

2.1 Определен е технологичен режим за азотиране на титанова сплав Ti-6Al-4V с апаратура тип APN-50, окомплектована с индиректен плазмотрон PN50;

2.2 Възстановен е вал на помпа Grundfos CRT от титанова сплав Ti-6Al-4V с използване на локално плазмено газово азотиране с индиректен плазмотрон PN50.

ПУБЛИКАЦИИ, СВЪРЗАНИ С ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Манов М., Скулев Х., Титан и титанови сплави - обзор, *Машиностроителна техника и технологии* 2, 2010, стр. 34-49, ISSN 1312-0859.
2. Манов М., Скулев Х., Методи за повърхностно уякчаване на титан и титанови сплави, *Машиностроителна техника и технологии* 1, 2010, стр. 26-32, ISSN 1312-0859.
3. Манов М., Скулев Х., Изследване на титанови сплави след повърхностно уякчаване чрез плазмено азотиране, *Машиностроителна техника и технологии* 1, 2010, стр. 32-36, ISSN 1312-0859.
4. Манов М., Скулев Х., Плазмено азотиране на Ti-6Al-4V с индиректен плазмотрон, *Известия на Съюза на учените*, 2010, стр. 25-29, ISSN 1310-5833.
5. Манов М., Скулев Х., Изследване влиянието на процеса плазмено газово азотиране върху корозионната устойчивост на титанови сплави Ti-8Al-1Mo-1V и Ti-6Al-4V, *Машиностроителна техника и технологии* 1, 2012, стр. 8-11, ISSN 1312-0859.