

РЕЦЕНЗИЯ

от чл. кор. д.т.н. Стефан Христов Христов

за дисертационен труд на тема “Теория и методология за обработване на титан и титанови сплави с индиректен плазмотрон” с автор проф. д-р инж. Христо Костов Скулев за получаване на образователно-научната степен „Доктор на науките“

Дисертационният труд е от област 5 “Технически науки, професионално направление 5.1 “Машинно инженерство”, научна специалност 02.01.02 “Материалознание и технология на машиностроителните материали”. Той представлява теоретично-експериментално изследване на нова модификация плазмотрон PN50, на процеса на плазмено газово азотиране на образци от титан и титанови сплави и на възможността за моделиране на процесите за плазмени слоеве със зададени свойства от титан и титанови сплави.

1. Актуалност на разработвания в дисертационния труд проблем

Свързвам актуалността на дисертационния труд с обстоятелствата, че в достъпната литература има относително малко информация за изследвания на конструктивни и технологични параметри, както на плазмотрони, така и на процеса на нанасяне с индиректен плазмотрон на модифицирани плазмени покрития. Все още липсват общоприети критерии за оценка на качеството на тези покрития, както и за аргументиран избор на параметрите на технологичния процес, независимо от неговото сравнително широко разпространение, особено когато става дума за титан и титанови сплави. Сложността на проблема произтича от обстоятелството, че плазмените покрития не са еднородни. Формират се повърхностен слой с различна дебелина, преходна зона и основен материал. Връзката между тях също може да варира. **Без съмнение проблема е актуален и значим както в научно, така и научно-приложно и приложно отношение.**

2. Степен на познаване на състоянието на проблема и творческа интерпретация на литературния материал

В кратко “Въведение” авторът е описал свойствата, предимствата и недостатъците на титановите сплави. Интересни са данните за бързото нарастване на приложението им в различни области, което потвърждава актуалността на работата.

Глава 1 представлява обстоен литературен преглед. Проучени и анализирани са 620 литературни източника. Разгледани са свойствата на титана и титановите сплави. Дадена е подробна информация за плазменото азотиране, като е добре характеризирана същността на прилаганите технологични процеси. Анализирани са съществените параметри (конструктивни и технологични) на съвремените плазмотрони. **Очевидно докторантът отлично познава проблема и творчески интерпретира достъпния литературен материал. Обстойният аналитично-критичен анализ е позволил удачно да се формулират целта и задачите на дисертационния труд.** Те не са лесни, защото са свързани с решаването на сложни многофакторни експериментални и теоретични задачи. Като се има предвид, че решаването на поставените задачи и постигането на целта на дисертационния труд ще доведе до създаването на нова методология, допълваща общата теория за индиректен плазмотрон и до практическа възможност за прогнозиране на структурата и свойствата на плазмено наваряваните слоеве, считам, че целите и задачите на дисертационния труд са правилно избрани и съвременно насочени.

3. Структура на дисертацията

Дисертационният труд включва Въведение, 8 глави, основни изводи, приноси, списък на използваната литература, 3 приложения и списък на публикациите по дисертацията. Обхваща общо 400 страници, като в тях са включени 227 фигури (152+75) и 43 (41+1) таблици, Използвани са общо 620 литературни източници на латиница и на кирилица.

4. Съответствие на избраните методики на изследване с поставените цел и задачи в дисертационния труд

Избраните методики, както за експерименталната, така и за теоретичната част от дисертацията, математическият апарат и компютърните модели са подходящи, правилно избрани и несъмнено позволяват да се изпълнят поставените задачи и да се постигне целта на дисертационния труд. Получени с тях резултати са достоверни.

5. Аналитична характеристика на дисертационния труд и оценка на достоверността.

Глава 2 е посветена на *изследване и оптимизиране на индиректен плазмотрон за повърхностна обработка на титан и титанови сплави*. Проведени са изследвания с предварителен характер. Получена е важна информация за влиянието на съществените параметри на процеса, както и за тяхното влияние върху стабилността на дъгата. Конструиран е плазмотрон с повишен к.п.д. като особено внимание е обърнато при пресмятане на катодния и анодния възли. Подходящо е приложен методът за топлинно натоварване, комбиниран с метода на декомпозицията. Резултатите от численото моделиране на температурното натоварване на катодния и анодния възли дават основание да се заключи, че избраните метод и конфигурация на катода и анода са адекватни. Изследвани са параметрите на плазмената струя и факторите, влияещи върху тях. Установено е значението на V-A характеристика на токоизточника. Получени са полезни данни за фазовия състав и микроструктурата на повърхностния слой на титанова сплав след плазмено въздействие. **Решена е първата от поставените задачи в дисертационния труд.**

Глава 3 се отнася до конструиране и изработване на индиректен плазмотрон PN50 за повърхностно модифициране на титанова сплав Ti-6Al-4V. Предложена е оригинална методика за пресметане на работните параметри, геометричните размери и системата за охлаждане на индиректен плазмотрон PN50. Направено е сравнение между плазмотрони с един, три и пет електрода. Разработени са симулационни модели за влиянието на температурните полета и флуидните потоци върху работата и ресурса на плазмотроните. Доказано е, че моделите са адекватни. Извършени са ресурсни изпитвания на катодните и анодните възли. **Създадена са нови модификации на индиректен плазмотрон за повърхностно газово обработване (азотиране). С това се решава втората от поставените задачи в дисертационния труд.**

В глава 4 е установено влиянието на значимите технологични параметри (работен ток, дебит на основния и допълнителния газове) върху измененията на напрежението и мощността на дъгата на плазмотрон PN50. Разработени са математически модели за определяне тежестта на влияние на всеки от тях. Адекватността им е проверена и доказана чрез критерия на Фишер. Изследван е честотният спектър на измерените сигнали. **Анализът на спектъра на получените сигнали дава възможност да се оптимизират технологичните и конструктивните параметри на системата за подобряване качествата на получените покрития. Решена е третата задача в дисертационния труд.**

Изследвана е ефективността на плазмотрон PN50, комплектован с катод с три електрода (Глава 5) Оценени са КПД на плазмотрона, стабилността на дъгата и измененията на изходната и входната мощности. Създаден е математичен модел и е разработен софтуерен продукт за определяне на оптималните технологични условия за плазмено нитриране на титанова сплав Ti-6Al-4V. **Решена е четвъртата от поставените задачи в дисертационния труд.**

Създадени са методики за компютърно моделиране на топлопренасянето и напрегнато-деформационното състояние на образци от титан и титанови сплави. Използвайки програмния продукт SolidWorks докторантът е създал модел за термичен анализ на азотирани образци от титанова сплав Ti-6Al-4V (**Глава 6**). Той и

разработеният софтуерен продукт дават възможност чрез симулационно моделиране да се определят оптималните режими на работа при повърхностно газоплазмено азотиране, да се установят зависимостите им върху температурата, термическия цикъл и скоростта на охлаждане, както и да се изследват процесите на напрегнатото и деформационно състояние на плазмено азотирани образци от Ti-6Al-4V. Резултатите от него позволяват да се оцени вероятността от появата на пукнатини след повърхностна обработка с индиректен плазмотрон на титан и титанови сплави.

Експериментално-статистически е изследвано на влиянието на оптималните режими върху параметрите на грапавостта, твърдостта и напрегнатото състояние на образците. Направени са и микроструктурен и фазов анализи на повърхностния слой. В резултат са получени нови данни за характеристиките на плазмено азотирани образци от Ti-6Al-4V.

Решена е петата от поставените задачи в дисертационния труд.

Резултатите от допълнителни експериментални изследвания за влиянието на плазменото газово азотиране с индиректен плазмотрон PN50 върху на структурата и свойствата на титан и значителен брой титанови сплави (Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-10V-2Fe-3Al и Ti-6Al-4V) са изложени в **Глава 7**. Получени са множество полезни данни за фазовия състав, микроструктурата и корозионната устойчивост на редица титанови сплави след плазмено газово азотиране. Изследвани са и процесите на повърхностно предварително азотиране, както и на нанасяне чрез плазмено напластяване на покритие от TiO₂ и хидроксиапатит (Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂). ***Решена е шестата от поставените задачи в дисертационния труд.***

Изследвано е плазмено напластено покритие от титанов двуокис и хидроксиапатит върху титанова сплав и неговото приложение (Глава 8.) Идеята е чрез повърхностно плазмено газово имплантиране да се създаде дентален имплант с ново покритие. Титановите сплави притежават изключителна биосъвместимост, но ниска твърдост и износоустойчивост. Като възможност да се премахнат тези недостатъци се разглежда процесът на повърхностно предварително азотиране и следващо нанасяне чрез плазмено напластяване на покритие от TiO₂ и хидроксиапатит (Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂) с индиректен плазмотрон PN50. Целта е да се създаде оригинална технология, с която да се създаде покритие с желаните качества и да се постигне надеждо сцепление между покритието и основния материал. За постигането ѝ са изпълнени са 4 групи експерименти: Повърхностно азотиране на сплав Ti-6Al-4V; Нанасяне на покритие от TiO₂ върху сплав Ti-6Al-4V, като първо е извършено плазмено азотиране и след това плазмено прахово напластяване на TiO₂; Нанасяне на покритие от TiO₂ върху Ti-6Al-4V след повърхностно абразивно струйно обработване на основата; Нанасяне на покритие от TiO₂ и Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂ върху Ti-6Al-4V 4V след повърхностно комбинирано обработване на основата – абразивно струйно обработване (пясъкоструене), азотиране и напластяване.

В резултат на изследванията на посочените образци са получени са редица нови, интересни и полезни данни за:

- фазовият състав на повърхността на слоя след плазмено газово азотиране, който се състои от α-Ti (N,O), TiN и TiO₂);
- микроструктурата, която е хомогенна и еднородна и микротвърдостта, влияеща се от мощността, повърхностната температура и врумето;
- разпределението на повърхностното натоварване върху импланта, коефициента на сигурност и дизайна на импланта.

За целта е са разработени два 3D модела, с които е проведена симулация и са получени числени резултати. В резултат за разработени дизайни на дентални имплантанти. Данните от изследванията са позволили да се създаде оригинална технология с която да се получи покритие с желаните качества и да се постигне надеждо сцепление между покритието и основния материал.

Проведен е експеримент с опитни животни, който доказва работоспособността на

разработената нова технология.

Анализът на цялостното съдържание на дисертационния труд ми дава основание да приема, че приложените методики са правилно избрани и са адекватни, че получените резултати за коректни и достоверни и да заключа, че поставените задачи са успешно решени и целта на дисертационния труд е постигната.

6. Приноси на дисертационния труд

Дисертационният труд представлява цялостно теоретично-експериментално изследване, което допълва общата теория за плазменото имплантиране с нова глава, която бих нарекъл “Теория на газовото плазмено азотиране на титан и неговите сплави с индиректен плазмотрон”. Получени са множество рзначими научни, научно-приложни и приложни приноси.

Научни приноси

- Предложена е нова методология, отнасяща се до изследване, конструиране и оценяване на индиректен плазмотрон;
- Разработен е теоретичен модел за формиране на електрическата дъга в индиректен плазмотрон;
- Предложена е нова хипотеза за влиянието на плазмена струя от индиректен плазмотрон при повърхностно модифициране на титан и титанови сплави върху структурата и свойствата на покритията, както и върху напрегнатото и деформирано състояние на образците

Научно-приложни приноси

Получени са редица научно-приложни приноси, част от които биха могли да бъдат групирани по следния начин:

Част от тях представляват методики, отнасящи се до индиректен плазмотрон, а именно:

- за проектиране на и пресмятане на ресурса му, за топлинно пресмятане на основните му възли;
- за определяне на стабилността на електрическата дъга,
- за оценяване на процеса на топлопренасяне и на топлинните потоци, за изследване и оценяване на влиянието на термичния цикъл при плазмено газово азотиране на титан и титанови сплави върху структурата, свойствата и качеството на получените слоеве,
- за изследване на напрегнато-деформационно състояние на образци и други.

Друга група приноси са свързани със създаването на компютърно-симулационни модели при плазмено газово азотиране на титан и титанови сплави:

- за влиянието на флуидните потоци върху ресурса на плазмотрон PN50;
- за определяне на ранга на влияние на технологичните параметри на режима, за определяне на оптималните технологични параметри;
- за разпределението на температурното поле и за напрегнатото и деформирано състояние на образците.

Приложни приноси

Получени са много приложни приноси като:

- Регресионни уравнения за пресмятане на режими, при които се постига повишена твърдост и зададена грапавост на плазмено модифицираните слоеве. Считаю, че този принос, предложен като научно-приложен, всъщност спада към приложните приноси. Впрочем докторантът е посочил подходящо приложение – изследване на влиянието на режимите върху микротвърдостта и грапавостта на реални зъбни импланти. Други приложни приноси са:
- Технологичните режими при плазмено газово азотиране на редица титанови сплави;
- Конструктивната документация на индиректен плазмотрон за плазмено газово азотиране PN50;
- Прототипите на плазмотрон с един, три и пет волфрамови електрода на катодния

възел и с общо водно охлаждане;

- Денталните имплантанти с покритие от хидроксиапатит и титанов двуокис.
- Универсалният 3D демонстрационен метод за моделиране на процесите на топлопренасяне и оценка на напрегнатото състояние след газоплазмено азотиране с индиректен плазмотрон PN50 на образци от титанова сплав от Ti – 6Al – 4V.

7. Преценка на публикациите по дисертационния труд

Проф. Скулев е представил списък на 14 труда по темата на дисертацията - седем самостоятелни и 7 в съавторство. Счита, че те биха могли да бъдат 15 защото в приложените трудове открих още един труд, който не фигурира в списъка, но според мен също има отношение, а именно "Плазмено газово азотиране на Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo с индиректен плазмотрон", който е индивидуален. Трудовете са публикувани в реномирани наши и чужди научни списания или в сборници на доклади, изнесени на конференции с международно участие, а именно:

- **в научни списания и поредици:** един брой в Galvanotechnik, един брой в Journal of optoelectronic and advanced materials, 2 броя в Известия на Съюза на учените – Варна, серия "Технически науки", 3 (4) броя в "Машиностроителна техника и технологии" на НТС – Варна,

- **в сборници намеждународни и наши конгреси и конференции с международно участие:** един брой в MEEMI'2005, един брой в МТФ'2007, 3 броя в UNITECH, един брой в ЕКОВАРНА2012, един брой в NDT DAYS 2014.

Очевидно обществеността, имаща отношение към проблемите на газовото плазмено азотиране на титан и неговите сплави с индиректен плазмотрон както у нас, така и в чужбина е добре запозната с главните части на дисертационния труд и постигнатите резултати и приноси.

8. Лично участие на дисертанта

От публикуваните научни трудове 7(8) са самостоятелни и 7 са в съавторство. Не са представени разделителни протоколи за тях. Въпреки това съм убеден, че дисертационният труд и приносите в него са преди всичко лично дело на докторанта.

9. Използване на резултатите от дисертационния труд

Засега няма данни за приложение на резултатите от дисертационния труд в практиката. Като имам предвид научно-приложните и приложните приноси считам, че в бъдеще без съмнение те ще намерят своето приложение, например при денталните имплантанти, при конструирането и изработването на индиректни плазмотрони, при проектирането на технологии за газовото плазмено азотиране и имплантиране на титан и неговите сплави с индиректен плазмотрон и други.

10. Оценка на автореферата

Представеният от докторанта автореферат на дисертацията е информативен и правилно отразява същността на отделните части от дисертационния труд, основните изводи и постигнатите приноси.

11. Цитирания: Не са посочени данни за цитирания на трудове на докторанта.

12. Критични бележки и препоръки

1. Обзорът (литературният преглед) е твърде обемист – 72 страници, като има и Въведение от 9 стр. В глави 2 и 3 също има елементи на литературен преглед. От една страна това показва, че докторантът обстойно се е запознал със съществуващото състояние и проблеми в областта на докторантурата. От друга страна, обаче, има изложени някои общоизвестни факти, което считам за излишно.

2 Научно приложните приноси са прекалено детайлизирани. Част от тях могат да бъдат групирани и обединени.

1. Опитната схема би могла да се подобри, ако се използва по-съвършена апаратура за измерване и регистрация на топлинните и силови полета. За съжаление тя е твърде

скъпа и трудно достъпна. Това би довело и до по-нататъшна подобряване на компютърния модел.

Направените критични бележки не омаловажават постиженията в дисертационния труд. Те би следвало да се разглеждат по-скоро като препоръки към бъдещата работа на докторанта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представеният ми за рецензиране дисертационен труд на проф. д-р инж. Христо Костов Скулев се решава актуален значим проблем, а именно газово плазмено азотиране и имплантиране на титан и неговите сплави с индиректен плазмотрон. Дисертационният труд е правилно конструиран, целите и задачите, са ясно поставени и са логично следствие от задълбочен критичен анализ на достъпната литература и съвременните постижения в тази област. Той представлява завършени теоретично-експериментални изследвания на нова модификация плазмотрон PN50, на процесите за плазмено газово азотиране на образци от Ti-6Al-4V и на възможността за моделиране на процесите за плазмени слоеве със зададени свойства от титан и титанови сплави. Избраните методи на изследвания са правилни и дават адекватен отговор на поставените цел и задачи на дисертационния труд. В изследванията си докторантът е съчетал уникални експериментални уредби с актуалното за науката и практиката моделиране и математическа обработка на експерименталните данни. Получени са съществени научни, научно-приложни и приложни приноси, значими за заваръчната теорията и практиката, които са отразени в международни и национални издания, на наши форуми с международно участие, както и международен конгрес у нас.

На базата на всичко казано до тук считам, че представеният ми за рецензиране дисертационен труд на тема **“Теория и методология за обработване на титан и титанови сплави с индиректен плазмотрон”** за образователно-научната степен "доктор на науките" отговаря напълно на изискванията на Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени в Технически университет –Варна и си позволявам да препоръчам на Почитаемото жури и на Факултетният съвет на МТФ да присъди на **проф. д-р инж. Христо Костов Скулев** образователно-научната степен **"доктор на науките"**.

София, 19.12.2016 г.

Рецензент: С. Христов