

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Керівник установи Грантоотримувача  
Проректор Державного вищого навчального  
закладу «Приазовський державний  
технічний університет» з наукової роботи

(посада)

Ленцов І. А.

ПІБ



## АНОТОВАНИЙ ЗВІТ

про виконану роботу у 2020 році в рамках реалізації проєкту  
із виконання наукових досліджень і розробок

Фазово-структурна та хімічна модифікація поверхні 3D-друкованих сплавів біомедичного  
призначення при обробці висококонцентрованими джерелами енергії для підвищення  
довговічності штучних імплантів

(назва Проєкту)

Назва конкурсу: Підтримка досліджень провідних і молодих вчених

Реєстраційний номер Проєкту: 2020.02/0064

Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок (реєстраційний номер та назва Проєкту) 2020.02/0064 «Фазово-структурна та хімічна модифікація поверхні 3D-друкованих сплавів біомедичного призначення при обробці висококонцентрованими джерелами енергії для підвищення довговічності штучних імплантів»

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу «Підтримка досліджень провідних і молодих вчених» протокол від «16-17» вересня 2020 року № 21

### 1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Тривалість виконання Проєкту

Початок – дата укладання Договору про виконання наукових досліджень і розробок;

Закінчення – 2022 рік.

Загальна вартість Проєкту, грн. 5 166,500 тис.

Вартість Проєкту по роках, грн.:

1-й рік 519,1 тис.

2-й рік 3 137,100 тис.

3-й рік 1 510,300 тис.

### 2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту буде залучено 6 виконавців, з них:

доктори наук 1 ;

кандидати наук 5 ;

інші працівники — .

### **3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(Ї) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ**

#### **4. ОПИС ПРОЄКТУ**

##### **4.1. Мета Проєкту (до 200 знаків)**

Розробка концепції управління зміцнювальною модифікацією поверхні 3D-друкованих сплавів біомедичного призначення висококонцентрованими джерелами енергії для підвищення ресурсу працездатності імплантів.

##### **4.2. Основні завдання Проєкту (до 400 знаків)**

1. Визначити особливості структури біомедичних сплавів, отриманих 3D-друком. 2. Дослідити закономірності структурно-хімічного модифікування 3D-друкованих біомедичних сплавів при обробці концентрованими джерелами енергії. 3. Вивчити трибокорозійний синергізм та його внесок в деградацію сплавів. 4. Розробити концепцію поверхневої модифікації 3D-друкованих біомедичних сплавів. 5. Розробити пропозиції з використання результатів проєкту.

##### **4.3. Детальний зміст Проєкту:**

###### **- Сучасний стан проблеми (до 400 знаків)**

Рівень захворювань опорно-рухового апарату зростає в усьому світі. Проблему вирішують застосуванням металевих імплантів, тривалість використання яких обмежена низькою зносостійкістю сплавів біомедичного призначення. Перспективним є застосування 3D-друкованих біомедичних сплавів, а також їх поверхневе зміцнення для підвищення довговічності імплантів. Втім, цей напрямок залишається майже недослідженим, а тому є актуальним для вивчення.

###### **- Новизна Проєкту (до 400 знаків)**

1. Атомно-кристалічна будова та мікроструктура біомедичних сплавів (нержавіюча сталь 316L, Ti-сплав Ti-6Al-4V, Co-Cr-Mo сплав), отриманих 3D-друком за технологією SLS.

2. Закономірності фазово-структурного та структурно-хімічного модифікування 3D-друкованих біомедичних сплавів лазерним променем потужністю до 400 кВт та імпульсною плазмою із щільністю енергії до  $2 \cdot 10^6$  кВт/м<sup>2</sup>.

3. Трибокорозійний синергізм при терті біомедичних сплавів в рідинах людського організму.

###### **- Методологія дослідження (до 400 знаків)**

Математичне та термодинамічне моделювання, виготовлення (3D-друк) дослідних зразків, обробка концентрованими джерелами енергії, проведення досліджень (електронна мікроскопія, енергодисперсійна спектроскопія, рентгенівська дифрактометрія, корозійні випробування, трибологічні випробування (коефіцієнт тертя, зносостійкість в корозійно-активних середовищах), визначення мікромеханічних властивостей (мікротвердість, наноіндентація).

#### **5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 2 сторінок) в поточному році/ в рамках реалізації Проєкту, зокрема:**

##### **5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту (із зазначенням їх якісних та кількісних (технічних) характеристик)**

Виконання першого етапу проєкту виконували у відповідності до технічного завдання та цілей, які було треба було досягти на першому етапі. У якості об'єкту експерименту були вибрані сплави, які є типовими представниками основних груп сплавів біомедичного призначення, а саме:

1. Нержавіюча сталь AISI 316L. Хімічний склад: вуглець – не більше 0,03 %; хром – 16,5-18,5 %; нікель – 10,0-13,0 %; молібден – 2,0-2,5 %; марганець – не більше 2,0 %; кремній – не більше 1,0 %; азот – не більше 0,11 %; сірка – не більше 0,030 %; фосфор – не більше 0,045 %; залізо - залишок.

2. Титановий сплав BT-6 (Ti-6Al-4V). Хімічний склад: алюміній – 5,50-6,75 %; ванадій – 3,50-4,50 %; вуглець – не більше 0,10 %; залізо – не більше 0,50 %; титан – залишок.

3. Сплав на кобальт-хромовій основі (Co-Cr-Mo). Хімічний склад: вуглець – не більше 0,05 %; хром – 28,0-30,0 %; молібден – 5,0-6,0 %; залізо, марганець, кремній – не більше 1,0 % кожного; – до 1,0 %; кобальт - залишок.

Як показав аналіз літературних джерел, вказані сплави найбільш широко використовуються в якості матеріалу для виготовлення металевих імплантів, які застосовують при проведенні хірургічного лікування захворювань опорно-рухливого апарату. Імпланти виробляють із монолітних матеріалів, виготовлених звичайними способами литва та гарячої пластичної деформації. Виготовлення вказаних сплавів методами адитивних технологій (3D-друк) є новим для практики виробництва імплантів.

Методологія проекту включає паралельне вивчення трьох груп сплавів біомедичного призначення, виготовлених як 3D-друком, так і за класичними технологіями (литво, пластична деформація). Це дасть змогу порівняти структуру та властивості біомедичних сплавів, вироблених за різними технологіями, і визначити перспективності використання 3D-друку при виготовленні металевих імплантів. В ході виконання першого етапу було замовлено виготовлення 105 експериментальних зразків методом 3D-друку на принтері ProX DMP 300 (по 35 зразків розмірами 15x15x5 (мм) та 20x10x5 (мм) із кожного з трьох типів сплаву). Друк виконували за технологією селективного лазерного спіканні (SLS) за допомогою волоконного лазера з довжиною хвилі 1070 нм. Виготовлення зразків оплачено, зразки поставлено виконавцям проекту. Окрім 3D-друкованих зразків придбано розхідні матеріали – листові заготовки тих самих сплавів біомедичного призначення, виготовлених за звичайною металургійною технологією. Із цих заготовок механічною обробкою виготовлено зразки розмірами 15x15x5 (мм) та 20x10x5 (мм) для експериментальних досліджень паралельно із 3D-друкованими зразками.

На першому етапі проекту було розроблено методику експерименту, яка включає поетапне виконання наступних завдань:

а) математичне та термодинамічне моделювання фазово-структурних перетворень в сплавах біомедичного призначення при зміцнювальних обробках поверхні;

б) реалізація організаційних питань проведення експерименту (придбання необхідного обладнання, виготовлення (3D-друк) дослідних зразків, підготовка проб для металофізичних досліджень, підготовка зразків для випробувань);

в) обробка зразків висококонцентрованими джерелами енергії (волоконний лазер з довжиною хвилі 1064 нм (TRUMPF «TruFiber 400»), аксіальний електротермічний плазмовий прискорювач з напругою розряду до 5 кВ);

г) проведення металофізичних досліджень, що включають: мікроструктурний аналіз (оптична, конфокальна та електронна (сканувальна, трансмісійна) мікроскопія), енергодисперсійна спектроскопія, флуоресцентна спектрометрія, рентгенівська дифрактометрія;

д) проведення корозійних (потенціометричних) випробувань;

є) проведення трибологічних випробувань (із визначенням коефіцієнту тертя і зносостійкості в корозійно-активних середовищах, близьких до рідин людського організму);

ж) визначення мікромеханічних властивостей (мікротвердість, модуль Юнга, наноіндентація, склерометрія);

з) опрацювання та узагальнення експериментальних результатів з написанням статей, доповідей та оформленням заявок на отримання об'єктів охорони інтелектуальної власності;

д) розробка пропозицій щодо подальшого використання результатів проекту.

В ході виконання першого етапу розроблено математичні моделі нагріву металевої поверхні лазерним променем та плазмовим імпульсом. Вони передбачають побудову температурних полів у металевому зразку, що нагрівається, з урахуванням температурних залежностей теплофізичних характеристик сплавів біомедичного призначення. В моделях використано принцип поверхневого точкового джерела енергії із заданою щільністю енергії. На основі моделювання із використанням побудованих моделей визначено попередні параметри обробки досліджених зразків висококонцентрованими джерелами енергії:

а) імпульсно-плазмова обробка:

- в режимі модифікування без оплавлення: напруга розряду на електродах – 3,5 кВ,

поверхнева щільність енергії  $(1,3-1,4) \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>; - в режимі модифікування з оплавленням: напруга розряду на електродах – 4,0-4,2 кВ, поверхнева щільність енергії  $(1,7-1,8) \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>;

б) обробка лазерним променем:

- в режимі модифікування без оплавлення: швидкість сканування – 25 мм/с, потужність – 55 Вт; - в режимі модифікування з оплавленням: швидкість сканування – 5 мм/с, потужність – 300 Вт; в режимі оплавлення/поверхневого легування: швидкість сканування – 5 мм/с, потужність – 400 Вт.

Однім із завдань першого етапу була модернізація електротермічного аксіального газотермічного плазмового прискорювача та придбання відповідних змінних частин (індуктивність, розрядник, з'єднувальні дроти тощо). Імпульсні струмені щільної плазми викликають модифікацію поверхневих шарів металевого виробу завдяки великим швидкостям процесів нагрівання, плавлення, кристалізації і охолодження приповерхневих шарів. Управління амплітудно-часовими характеристиками плазмового струменя, який витікає зі електротермічного плазмового прискорювача, джерелом живлення якого є ємнісний накопичувач енергії, можна здійснювати програмованим вибором параметрів елементів електричного кола джерела живлення. Дана обставина дозволила модернізувати плазмовий прискорювач, для чого в коло джерела живлення було послідовно до ємнісного накопичувача і магнітного ключа вмонтовано керовану індуктивність. На сердечнику індуктивності розміщено котушку, через яку пропускається постійний струм таким чином, що магнітні поля від цього струму (підмагнічування) і струму в колі джерела збігаються у напрямку. Варіація величиною струму намагнічування дозволила досягати необхідного початкового значення відносної магнітної проникності сердечника, а, отже, і заданої величини керованої індуктивності. У свою чергу це дозволило керувати тривалістю формування і витікання плазмового струменя з плазмового прискорювача. Таким чином, при однаковому енерговкладенні в струмінь плазми були досягнуті різні часи впливу плазмового потоку на поверхню виробу, що дозволяє в подальшому керувати товщиною та властивостями модифікованого приповерхневого шару дослідних зразків.

## **5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами**

Модернізований електротермічний плазмовий прискорювач не має аналогів, а тому його використання для поверхневого зміцнення біомедичних сплавів матиме переваги перед існуючими способами плазмової обробки.

## **5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)**

Згідно з технічним завданням на першому етапі проєкту не було передбачено отримання експериментальних результатів, які б могли становити практичну цінність для економіки та суспільства.

## **5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці.**

Перший етап є підготовчим у виконанні всього проєкту. Розроблена методика, виготовлені дослідні зразки, модернізоване обладнання будуть використані на подальших етапах при проведенні досліджень, запланованих на 2021-2022 роки.

Анотований звіт не містить відомостей, заборонених до відкритого опублікування

**Науковий керівник Проєкту**

Завідувач кафедри фізики, професор

(посада)

Сфременко Василь Георгійович

ПІБ

  
(підпис)