

УДК 519.682+66.03+672.9

**Ю.В. Куц***Луцький національний технічний університет***КОМП'ЮТЕРНО-ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНИХ  
ПОКРИТТІВ НА ЦИЛІНДРИЧНУ ДЕТАЛЬ**

*У статті наведена комп'ютерна програма нанесення захисних покриттів на порошкові матеріали. Показана розробка дозволяє імітувати напилення захисного шару та порівнювати два методи: електрометалізаційний та плазмово-електролітичне окиснення.*

*Ключові слова: ПЕО, порошковий матеріал, захисне покриття.*

**Ю.В. Куц***Луцький национальный технический университет***КОМПЬЮТЕРНО-ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ  
ПОКРЫТИЙ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ**

*В статье представлена компьютерная программа нанесения защитных покрытий на порошковые материалы. Показана разработка позволяет имитировать напыления защитного слоя и сопоставлять два метода: электродуговой и плазменно-электролитическое окиснение.*

*Ключевые слова: плазменно-электролитическое окиснение, порошковый материал, защитное покрытие.*

**Yu. Kuts***Lutsk National Technical University***COMPUTER SIMULATION MODELING APPLICATION OF PROTECTIVE COATINGS ON  
THE DETAILS**

*The article presents a computer program drawing of sheeting's on powder materials. Shown elaboration allows simulating a protective layer coating and comparing two methods: electric arc and plasma-electrolytic oxidation.*

*Keywords: plasma-electrolytic oxidation, powder material, protective coating.*

**Постановка проблеми.** Комп'ютерні технології відкривають широкі можливості високоефективної організації проведення і забезпечення результативності навчального та виробничого процесу.

Сьогодні існує багато комп'ютерно-імітаційних систем і ресурсів, але не всі з них можуть виконувати інженерні розрахунки.

Головною причиною порівняно низького ресурсу в машинобудуванні є знос деталей. Одним із основних напрямків підвищення довговічності деталей в сучасних умовах є вдосконалення низьковартісних технологічних процесів відновлення цих деталей у поєднанні з використанням доступних і дешевих матеріалів при гарантованих високих показниках надійності відремонтованих виробів. Рішення цієї задачі стримується обмеженим використанням сучасних способів ремонту та відновлення деталей. Найбільш перспективним є електрометалізаційне відновлення та ПЕО метод. Таким чином ми вирішили їх об'єднати у нашій комп'ютерній програмі та автоматизувати ці процеси.

Під час розробки нашого проекту ми зупинили свій вибір на мові програмування високого рівня, а саме Java Script.

На сьогоднішній день існує велика кількість модулів та бібліотек для реалізації різноманітних задач.

*Метою даної роботи* була розробка комп'ютерної моделі, що дозволяє імітувати напилення захисного шару та порівнювати два методи: електрометалізаційний та ПЕО.

Нашу програму можна використовувати не тільки на виробництві, але і у навчальному процесі для наочного показу технології напилення захисного шару студентам.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Спеціальні комп'ютерні програми підвищують якість навчання та реалізації процесу за рахунок проведення великої кількості операцій за малий відрізок часу.

Переглянувши та проаналізувавши останні публікації [1] та літературу нами було виявлено, що наша програма є унікальною[2]. Багато науковців просто порівнюють методи, але не використовують комп'ютерне забезпечення, такі як: Ю.В.Бусило, А.Е.Черепко, О.А. Тамаргазін, Л.А.Лопата, В.І. Похмурский.

Портякін О.О., Тинькоса С.М., Піскажова Т.В. розробили комп'ютерну програму для вивчення теплообмінних процесів., у ній можна виконувати статичні розрахунки, динамічні розрахунки, у неї влаштовані бази даних та виконується візуалізація результатів у вигляді таблиць та графіків [3]. Ю.В.Бусило та А.Е.Черепко у своїх працях проводили порівняльний аналіз властивостей покриттів нанесених традиційним електродуговим напиленням (ЕДН) — що використовує для розпилювання газ-повітря, і активованим електродуговим напиленням (АДН) — яке для розпилювання використовує продукти згоряння пропано-повітряної суміші[4]. О.А. Тамаргазін, Ю.В.Бусило, Л.А.Лопата у своїх роботах розглядали первинні (технологічні чинники), що стосуються технології та умов напилення і вторинні, які є похідними від технологічних факторів, що впливають на структуроутворення і властивості покриттів. Узагальнюючи результати досліджень щодо впливу чинників процесу електродугового напилення на структуроутворення і властивості покриттів, встановили параметри процесу електродугового напилення[5]. В.І. Похмурский у своїх роботах займався структурою і фізико-механічними характеристиками електродугових покриттів та режимів їх нанесення [6].

**Основна частина.** Комп'ютерне моделювання — метод розв'язування задачі аналізу або синтезу складної системи, що ґрунтується на використанні її комп'ютерної моделі. Сутність комп'ютерного моделювання полягає у відшуканні кількісних і якісних результатів із залученням наявної моделі. Якісні висновки, зроблені на підставі такого дослідження, дають змогу розкривати невідомі досі властивості складної системи: її структуру, динаміку розвитку, стійкість, цілісність тощо. Кількісні висновки мають переважно характер прогнозу майбутніх чи пояснення минулих значень змінних, що характеризують систему.

Також слід відмітити, що проведення обчислювального експерименту за допомогою комп'ютерно-інформаційні технологій має ряд переваг перед натурним експериментом, наприклад:

- для нього не потрібно складного лабораторного устаткування;
- істотне скорочення тимчасових витрат на експеримент;
- можливість вільного керування та довільної зміни параметрів;
- можливість проведення обчислювального експерименту там, де натурний експеримент неможливий через віддаленість досліджуваного явища, наприклад у просторі, або через його значну тривалість у часі, а також через можливість внесення необоротних змін у досліджуваний процес.

Тому, під терміном моделювання розуміють створення моделі, а також дослідження об'єктів за допомогою побудови і вивчення їх моделей.

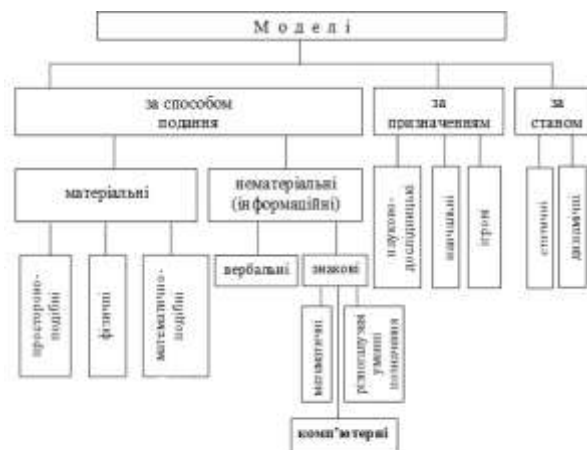


Рис. 1. – Класифікація моделей

Комп'ютерна модель – математична модель, реалізована за допомогою певних програмно-апаратних засобів [7, 8].

Наше програмне забезпечення реалізоване у JavaScript, котра характерна великим вибором бібліотек та конструкторів.

JavaScript – це динамічна мова програмування. Це інтерпретована мова програмування з об'єктно-орієнтованими можливостями. На стороні клієнта JavaScript є найбільш поширеною

формою мови. Сценарій повинен бути включений в систему або на який посилається HTML-документа для коду, який буде інтерпретуватися браузером [9-11].

Програма має наступні функціональні можливості:

- Виконання статичних розрахунків: час напилення, товщина напилення, пористість (при заданні різних умов)

- Використання встроєних баз даних, які необхідні для проведення розрахунків і перевірки їх вірності

- Візуалізація результатів у вигляді графіків, таблиць та трьохвимірної деталі.

Комп'ютерна програма дозволяє з допомогою кольорових зображень побачити наочно результати.

Нами ведеться розробка програмного забезпечення направлено на вивчення та вирішення проблем захисних покриттів та порівняння двох методів напилення.

Програма не тільки поєднує в собі обчислювальні методи, але також візуалізацію отриманих результатів.

Для відтворення та порівняння захисного покриття методом ПЕО і електрометалізаційним методом необхідно задати дані які виведені на табло

Задаємо: внутрішній діаметр деталі, зовнішній діаметр, висоту деталі.

Також характеристики, які стосуються методів напилення:

- продуктивність напилення
- дефектний шар
- знос поверхні
- густину матеріалу
- швидкість обертання деталі
- швидкість переміщення металізатора відносно напилювальної поверхні (Рис. 2).

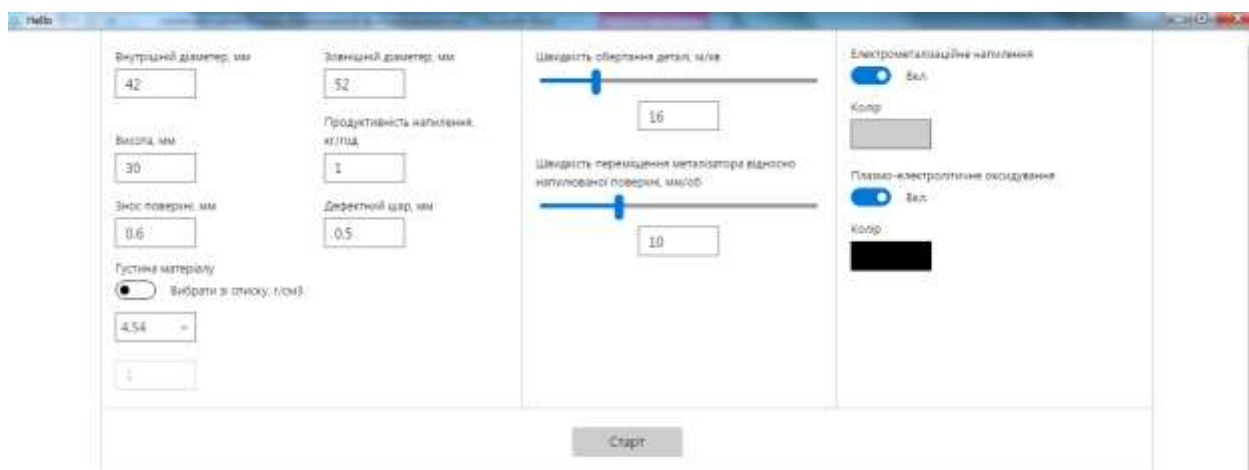


Рис. 2. – Інтерфейс програми «Комп'ютерно – імітаційне моделювання для напилення захисних покриттів на деталь»

Наприклад, нам необхідно за допомогою програми напилити поверхню втулки і отримати розміри  $d=50\pm 0.08$  мм;  $L = 30$  мм; сталь 25ХГ; знос поверхні –  $z_{\Pi}=0,6$  мм.

Таблиця 1

#### Вхідні параметри для програми

Діаметр деталі, які необхідно отримати	$d$	$50\pm 0.08$ мм
Діаметр деталі після обробки поверхні під напилення	$d_{\Pi}$	48,4 мм
Розмір даного елемента заготовки	$d_{H}$	52 мм
Довжина деталі	$L$	30 мм
Знос поверхні	$z_{\Pi}$	0,6 мм

Припуск на механічну обробку попередньої	$Z_{мп}$	0.2 мм
Дефектний шар	Сд	0.5 мм
Припуск на механічну обробку		0.5 мм
Кількість обертів за хвилину	n	100 об/хв.
Переміщення металізатора відносно напилюваної поверхні	S	10 мм/об
Припуск під напилення	$Z_0$	1.8 мм

Загальний припуск на обробку  $Z_0$  дорівнює сумі міжопераційних припусків  $Z_i$  від заготовки до готової деталі:

$$Z_0 = \sum_{i=1}^n Z_i \quad (1)$$

де n – кількість операцій.

Тоді припуск під напилення складає:

$$Z = (d_n - d_n) \quad (2)$$

де  $d_n$  – розмір даного елемента заготовки;  
 $d_n$  – розмір того ж елемента готової деталі.

Тобто, ми повинні нанести  $Z=3,6$  мм покриття на 1 сторону  $Z_0= 1.8$  мм.

$$Z_0 = (d_n - d_n) / 2 \quad (3)$$

Такий шар може бути нанесено за 1 прохід плазмотрону.  
 Основний час напилення буде складати:

$$t_0 = L / (n \cdot S) \quad (4)$$

де L – довжина деталі,  
 n – кількість обертів за хвилину,  
 S – переміщення металізатора відносно напилюваної поверхні ;

В нашому випадку  $t_0 = 3,2$  хв.

Електричні параметри синтезу ОКП підбирають, як правило, експериментально, без належного теоретичного обґрунтування. Проте саме густина струму та напруга визначають характер та інтенсивність електричних розрядів і температурні умови на поверхні сплаву, та впливають на функціональні характеристики покриття.

Тому в ході багатьох досліджень ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України нами було виявлено закономірність, яку ми внесли у програму.

В середньому за 1 хвилину 1-5 мкм наростає захисного оксидованого покриття.

Основними електрофізичними параметрами процесу є анодна напруга  $U_a$ , катодна напруга  $U_k$ , густини катодного і анодного струмів  $I_k$ ,  $I_a$ , тривалість імпульсів і їх частота, тривалість процесу  $\tau$ , хв.,  $I_k/I_a=1$



Рис. 3. – Зображення моделі деталі після наплення

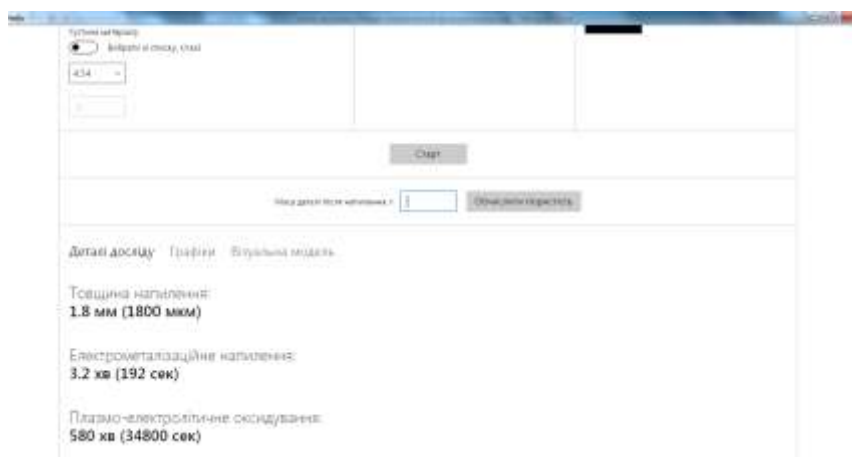


Рис. 4. – Порівняння двох методів наплення за часом

Таким чином програма порівнює два методи і показує за який відрізок часу буде зроблена дана товщина наплення електрометалізаційним методом чи ПЕО методом.

В такому випадку ми бачимо і вирішуємо, який нас влаштовує. Можна використовувати 2 методи. Електрометалізаційний слугитиме своєрідною підложкою для ПЕО метода. Таким чином це дасть нам більшу мікротвердість деталі, корозійну стійкість та довговічність.

При збільшенні дистанції напилування спостерігається підвищення пористості. В цьому випадку відбувається не тільки зниження температури частинок в момент зіткнення з основою, але і падає їх швидкість, що й обумовлює такий характер зміни пористості напвлених матеріалів. На невеликих відстанях наплення, відповідних утворенню щільності покриття з малою пористістю, може статися перегрів і деформація основи. Крім цього, при напленні на малих дистанціях можуть виникнути труднощі, пов'язані з отриманням рівної поверхні покриття.

Зі збільшенням дистанції напилування кількість пор в покритті (відкрита пористість) стає більшою. Найбільш щільними і мають найменшу відкриту пористість є покриття, отримані дротовим напленням. Більшість часу в такому покритті ізолювано від зовнішнього середовища, тобто пористість тут, в основному, закрита.

При нанесенні порошкових матеріалів зниження витрати напилуваного порошку і зменшення швидкості переміщення пальника призводить до деякого збільшення щільності покриття.

Покриття, отримані при більш високій температурі основи, мають підвищений зчепленням частинок між собою і більш низькою пористістю.

В програмі вписуємо масу втулки після наплення і визначаємо пористість:

$$\Pi = (1 - \rho_m / \rho) \times 100\% \quad (5)$$

де  $\rho_m$  – середня густина матеріалу, г/см<sup>3</sup> ;

$\rho$  – істинна густина матеріалу, г/см<sup>3</sup>.

Середня густина матеріалу (в нашому випадку це щільність) – це маса одиниці об'єму матеріалу у природному стані, тобто разом з порами і пустотами. Вона позначається буквою  $\rho$  і обчислюється за формулою:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (6)$$

де  $m$  – маса матеріалу, г;

$V$  – об'єм матеріалу у природному стані, см<sup>3</sup>.

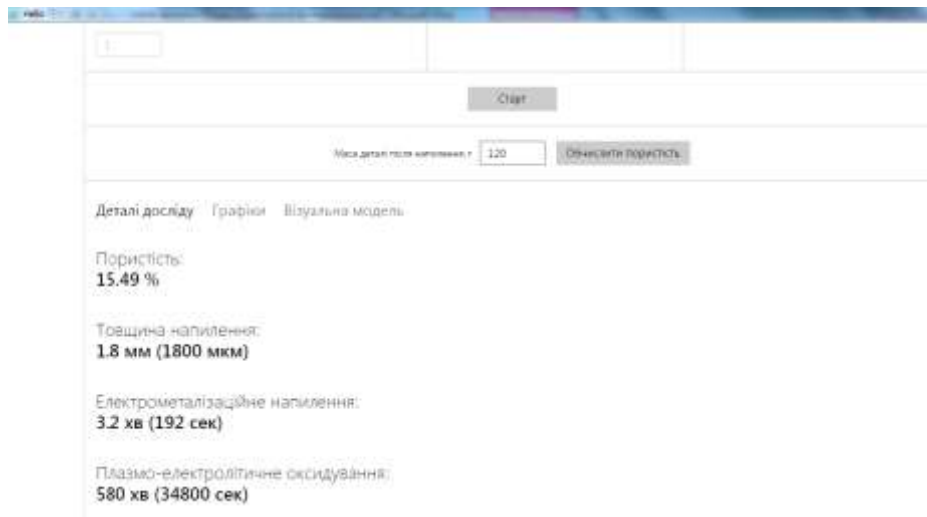
Істинна густина (в нашому випадку ми беремо густину нашого металу) – це маса одиниці об'єму матеріалу в абсолютно щільному стані, тобто без пор і пустот. Для визначення істинної густини матеріалу потрібно знати масу матеріалу та його об'єм у абсолютно щільному стані.

Позначається істинна густина буквою  $\rho$  грецького алфавіту і визначається за формулою:

$$\rho = \frac{m}{V_a} \quad (7)$$

де  $m$  – маса зразка у сухому стані, г;

$V_a$  – об'єм зразка у абсолютно щільному стані, см<sup>3</sup>



**Рис. 5. – Показ в інтерфейсі програми вихідних показників(пористість, товщина напильника, час напильника)**

Якість покриттів і властивості в значній мірі залежать від тиску розпилювального газу і дистанції напильвання. Більшість дослідників сходяться на думці, що підвищення тиску сприяє збільшенню адгезії покриття і зниженню пористості. На графіках (рис.6) ми можемо спостерігати нарощування захисного шару в той чи інший відрізок часу.

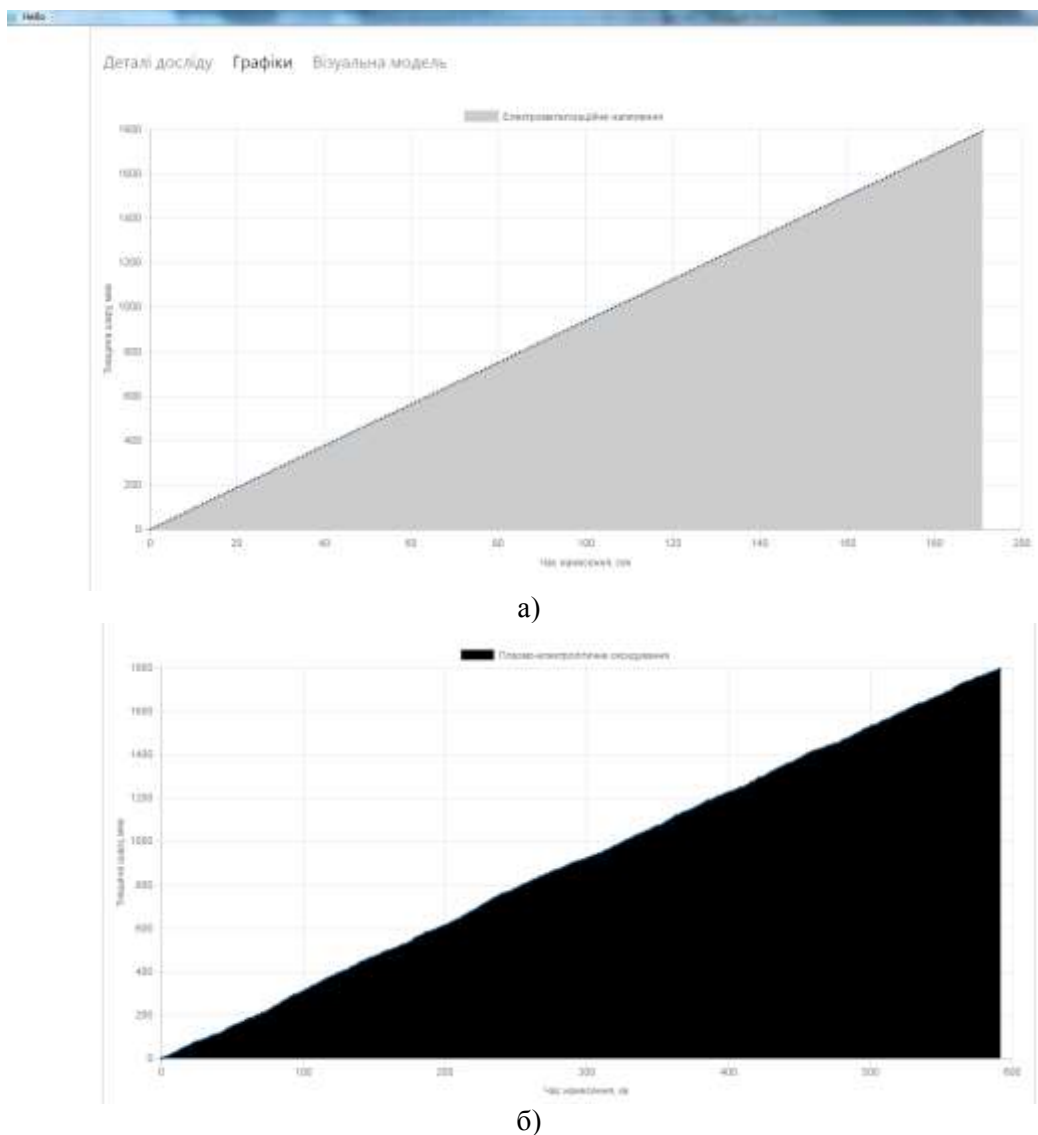


Рис. 6 – Графіки залежності товщини шару від часу у електрометалізаційному (а) та ПЕО методах наплення (б)

Таблиця 2

Порівняння електрометалізаційного та ПЕО методів наплення по часу

Методи наплення	Товщина наплення, мм	Час наплення, хв
Електрометалізаційний метод	1,8	3,2
ПЕО метод	1,8	588
Електрометалізаційний метод	2	3,2
ПЕО метод	2	675
Електрометалізаційний метод	2,2	3,2
ПЕО метод	2,2	716
Електрометалізаційний метод	2,6	3,3
ПЕО метод	2,6	873
Електрометалізаційний метод	2,7	3,3
ПЕО метод	2,7	907

**Висновки.**

Таким чином, в рамках даної роботи розроблена комп'ютерна програма «Комп'ютерно – імітаційне моделювання для наплення захисних покриттів на деталь».

Дане програмне забезпечення дозволяє виконувати статичні розрахунки: час напилення, товщина напилення, пористість (при заданні різних умов)

У неї вбудовані бази даних, які необхідні для проведення розрахунків і перевірки їх вірності. В інтерфейсі програми проводиться візуалізація результатів у вигляді графіків, таблиць та трьохвимірної деталі.

Дане програмне забезпечення направлене на вивчення та вирішення проблем захисних покриттів та порівняння двох методів напилення, а саме електрометалізаційного та ПЕО.

Дана програма дає можливість користувачу самому керувати процесом та визначати, якою товщиною та з якого саме матеріалу буде захисний шар.

#### Список використаних джерел:

1. Соколов В. Н., Юрковец Д. И., Разгулина О. В., Мельник В. Н. Программно-аппаратный комплекс для исследования микроморфологии поверхности твердых тел по РЭМ-изображениям/Поверхность.1998. № 1. С. 33 -40.
2. А. с. №71207 Комп'ютерна програма «Комп'ютерно- імітаційне моделювання для напилення захисних покриттів на деталь» / Ю. В. Куц, О. Ю. Повстяной (Україна). – дата реєстрації 29.03.2017
3. Петрянкин А.А., Тинькова С.М., Пискажова Т.В. Учебно-консультационная компьютерная программа для изучения теплообменных процессов//Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия, Вестник МГТУ, 2016, Т14,№1.
4. Brusilo Y. V, Investigation of properties of coatings deposited by different arc spraying methods/ Brusilo Y. V., Cherepko A. E.-Наукоємні технології, 2013. № 4 (20)
5. А. А. Тамаргазин, Л.А.Лопата, Ю.В. Брусило, С.А. Довжук Влияние факторов процесса электродугового напыления на структурообразование и свойствапокрытий// Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, 2010, випуск 23
6. Похмурский В. И., Студент М. М., Довгуньк В. М. и др. Порошковые проволоки систем FeCrV+Al и FeCrV+Al+C для электродуговой металлизации // Автоматическая сварка. - 2002. - № 3. - С. 32-35.
7. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: Учеб. для вузов. — М.: Высш. шк., 2001. — 343 с.) Шелобаев С. И. Математические методы и модели в экономике, финансах, бизнесе: Учеб. пособие для вузов. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2000. — 367 с.
8. Маценко В.Г. Обчислювальна техніка та програмування: Навчальний посібник. – Чернівці: ЧНУ, 2010 – 112 с.
9. Основи інформатики та обчислювальної техніки : підручник / В. Г. Іванов, В. В. Карасюк, М. В. Гвозденко ; за заг. ред. В. Г. Іванова. — Х. : Право, 2012. — 312 с.
10. JavaScript The Good Parts/ Douglas Crockford - JavaScript: сильные стороны. — СПб.: Питер, 2012. — 176 с: ил.
11. Флэнаган Д./JavaScript. Подробное руководство. – Пер. с англ. – СПб: Символ\_Плюс,2008. – 992 с., ил.

Стаття надійшла до редакції 10.05.2017