

УДК 621.793

А.Ю. АНДРЕЙЦЕВ
Державний університет інфраструктури та технологій
І.В. СМІРНОВ, А.В. ЧОРНИЙ, С.М. МІНАКОВ
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СФЕРОЇДИЗАЦІЇ ЧАСТИНОК ПОРОШКУ ПЛАЗМОВО-ДУГОВИМ МЕТОДОМ

Багато сучасних технологічних процесів вимагають використання металевих, керамічних та метало-керамічних порошків, частинки яких мають ідеальну сферичну форму. Отже, виникає задача ефективної сфероїдизації порошків, що використовуються. Найбільш ефективним способом сфероїдизації є обробка порошку в потоці низькотемпературної плазми.

Для отримання частинок ідеальної сферичної форми необхідно, щоб до кінця дистанції частинка мала мінімальну швидкість і температуру, щоб уникнути деформації під час удару об поверхню для збору порошку. Крім того, в процесі польоту частинка повинна повністю розплавитись, але не досягати температури випаровування, а потім затвердіти.

Задача моделювання процесу сфероїдизації частинок порошку плазово-дуговим методом зводиться до визначення швидкості і температури частинки в потоці низькотемпературної плазми з урахуванням зміни її агрегатного стану.

Визначення швидкості частинки проведено з урахуванням того, що єдиною силою, що діє на неї, є сила аеродинамічного опору. Швидкість плазового потоку апроксимуємо експоненціальною функцією. В результаті, отримуємо неявний розв'язок диференціального рівняння для визначення швидкості частинки вздовж дистанції.

Для дослідження температурного режиму розглядаємо п'ять ділянок дистанції.

На першій з них (розігрів частинки до температури плавлення) використовуємо для визначення температури рівняння теплового балансу.

Друга ділянка – процес плавлення частинки. Тут ми визначаємо час плавлення частинки, виходячи з рівняння теплового балансу, за умови відсутності теплового потоку на межі фазового переходу.

Третя ділянка – політ частинки в розплавленому стані. Для моделювання процесу розв'язуємо крайову задачу для одновимірного рівняння теплопровідності для сферичного тіла, апроксимуючи температуру плазми кубічними сплайнами.

Для четвертої ділянки (затвердіння частки) використана та ж модель, що і для другого. А на п'ятому (охолодження частки) – такий самий підхід, що й на третьому.

На завершення наведені результати для частинок титану діаметром 10 мкм.

Ключові слова: сфероїдизація, плазово-дуговий метод, плазовий потік, тепловий баланс, рівняння теплопровідності.

А.Ю. АНДРЕЙЦЕВ
Государственный университет инфраструктуры и технологий
И.В. СМІРНОВ, А.В. ЧОРНИЙ, С.Н. МІНАКОВ
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СФЕРОИДИЗАЦИИ ЧАСТИЦ ПОРОШКА ПЛАЗМЕННО-ДУГОВИМ МЕТОДОМ

Многие современные технологические процессы требуют использования металлических, керамических и метало-керамических порошков, частицы которых имеют идеальную сферическую форму. Следовательно, возникает задача эффективной сфероидизации используемых порошков. Наиболее эффективным способом сфероидизации является обработка порошка в потоке низькотемпературной плазмы.

Для получения частиц идеальной сферической формы необходимо, чтобы к концу дистанции частица имела минимальную скорость и температуру, чтобы избежать деформации при ударе о поверхность для сбора порошка. Кроме того, в процессе полёта частица должна полностью расплавиться, но не достигать температуры испарения, а потом затвердеть.

Задача моделирования процесса сфероидизации частиц порошка плазменно-дуговым методом сводится к определению скорости и температуры частицы в потоке низкотемпературной плазмы с учетом изменения её агрегатного состояния.

Определение скорости частицы проведено с учётом того, что единственной силой, действующей на неё, является сила аэродинамического сопротивления. Скорость плазменного потока аппроксимируем экспоненциальной функцией. В результате получаем неявное решение дифференциального уравнения для определения скорости частицы вдоль дистанции.

Для исследования температурного режима рассматриваем пять участков дистанции.

На первом из них (разогрев частицы до температуры плавления) используем для определения температуры уравнение теплового баланса.

Второй участок – процесс плавления частицы. Здесь мы определяем время плавления частицы, исходя из уравнения теплового баланса, при условии отсутствия теплового потока на границе фазового перехода.

Третий участок – полёт частицы в расплавленном состоянии. Для моделирования процесса решаем краевую задачу для одномерного уравнения теплопроводности для сферического тела, аппроксимируя температуру плазмы кубическими сплайнами.

Для четвертого участка (затверждение частицы) использована та же модель, что и для второго. А на пятом (остывание частицы) – тот же подход, что и на третьем.

В завершении приведены результаты для частиц титана диаметром 10 мкм.

Ключевые слова: сфероидизация, плазменно-дуговой метод, плазменный поток, тепловой баланс, уравнение теплопроводности.

A.Yu. ANDREYTSEV

State University of Infrastructure and Technologies

I.V. SMYRNOV, A.V. CHORNYI, S.N. MINAKOV

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

MODELING THE PROCESS OF SPHEROIDIZATION POWDER PARTICLES BY THE PLASMA-ARC METHOD

Many modern technological processes require the use of metallic, ceramic and metal-ceramic powders, the particles of which have an ideal spherical shape. Consequently, the task arises of effective spheroidization of the powders used. The most effective way of spheroidization is powder treatment in a low-temperature plasma flow.

In order to obtain perfect spherical particles, it is necessary that by the end of the distance the particle has minimal velocity and temperature in order to avoid deformation upon impact with the surface to collect the powder. In addition, during the flight, the particle must completely melt, but not reach the evaporation temperature, and then solidify.

The problem of modeling the process of spheroidization of powder particles using the plasma-arc method is reduced to determination of the particle velocity and temperature in the low-temperature plasma flow considering changes in its aggregate state.

Determination of the particle velocity is carried out considering the fact that the only force acting on it is the force of aerodynamic resistance. The plasma flow velocity is approximated by an exponential function. As a result, we obtain an implicit solution of the differential equation for determining the velocity of the particle along the distance.

To investigate the temperature mode, we consider five sections of the distance.

On the first of them (heating the particle to the melting temperature), we use the heat balance equation to determine the temperature.

The second section is the process of particle melting. Here we determine the melting time of the particle, based on the heat balance equation, provided there is no heat flow at the phase transition boundary.

The third section is the flight of the particle in the molten state. To model the process, we solve the boundary problem for the one-dimensional heat equation for spherical solid by approximating the plasma temperature with cubic splines.

For the fourth section (solidification of the particle) the same model as for the second one is used. And for the fifth (cooling of the particle), the same approach as for the third.

Finally, the results for titanium particles with a diameter of 10 μm are presented.

Keywords: spheroidization, plasma-arc method, plasma flow, heat balance, heat equation.

Постановка проблеми

Бурхливий розвиток адитивних технологій став стимулом отримання металевих, керамічних або металокерамічних порошків сферичної форми певного гранулометричного складу (10–40 мкм). При цьому на поверхні частинок порошку не повинно бути шорсткостей та нерівностей, бо це ускладнює пошарове нанесення порошкового матеріалу під час 3D друку.

Порошки отримують різними способами, які, як правило, не забезпечують зазначених характеристик вихідних частинок, в цьому випадку додатково призначають технологічну операцію зі сфероїдизації.

Найбільш ефективним способом сфероїдизації є обробка порошку в потоці низькотемпературної плазми. Для генерації низькотемпературної плазми використовують різні види електричних розрядів – дуговий (ЕД), високочастотний (ВЧ), надвисокочастотний (НВЧ), а також комбіновані розряди. Потужність сучасних ЕД плазмотронів досягає 3 МВт, тепловий ККД 70–85%, ресурс роботи до 10^3 год. Використання V-подібних ЕД плазмотронів з вольфрамовими електродами в середовищі інертного газу аргону забезпечує відсутність домішок матеріалу електродів в потоці плазми та, як наслідок, отримання високочистих порошків.

Останнім часом для сфероїдизації порошків зростає інтерес до плазмових технологій із застосуванням ВЧ та НВЧ плазмотронів, головним чином завдяки унікальним особливостям: відсутність електродів (витратних матеріалів); робоче середовище з високою чистотою (відсутність ерозії електродів); осьове нагнітання вихідної сировини в зону з найвищою температурою плазми; досить тривалий час перебування частинок порошку в потоці гарячого газу (до 500 мс, в залежності від конструкції реактора) за рахунок великого об'єму плазми; розряд може відбуватись у різних типах атмосфер (інертній, відновлювальній або окислювальній).

Процес формування сферичних частинок можна описати так. Потрапляючи в потік плазми, частинки, які у вихідному стані мали неправильну форму, під час руху в високотемпературному швидкісному газовому потоці розігріваються до температури плавлення і під дією сил поверхневого натягу перетворюються в частинки, які під час охолодження у вільному падінні формуються в сферичні гранули.

Висока температура плазми, яка може досягати 10000°C , дозволяє розплавляти та випаровувати будь-які метали. Контролюючи такі параметри, як швидкість подачі, траєкторію руху порошку, витрати плазмоутворюючого газу, потужність плазмового потоку, можна досягти отримання частинок порошку заданого складу зі сферичною формою.

Для детального аналізу динаміки нагріву частинок порошку, які пролітають крізь плазмовий потік, необхідна розробка математичних моделей визначення швидкості та температурного поля частинки під час сфероїдизації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Процеси плазмового отримання сферичних порошків, як і газотермічного напилення покриттів з порошків досліджували, як правило, одні і ті ж науковці. Провідні позиції в даній галузі займають американські та канадійські вчені: E. Pfender, C. Bemdt, J. Mostaghimi, M.I. Boulos та інші [1-4].

В огляді [1] підкреслюються можливості канадської компанії «Текна», яка є світовим лідером у виробництві високоякісних сферичних порошків для індустрії адитивного виробництва. Досягнення у моделюванні процесу газотермічного напилення розглянуті в [2]. В [3] досліджено температуру, швидкість та розмір частинок в середині плазмового потоку на заданій відстані. Для розподілу частинок була використана стохастична дискретна модель.

В [5] було розвинуто модель для визначення швидкості частинки в процесі плазмового напилення. [6] присвячена розрахунку термодинамічних характеристик частинки з урахуванням зміни її фізико-хімічних характеристик і відповідних характеристик плазми. Визначенню температури частинок з урахуванням зміни агрегатного стану присвячено [7]. В [8] зроблено уточнення моделі визначення температури за допомогою апроксимації температури плазми кубічними сплайнами.

Мета дослідження

Метою даної роботи є побудова багатокрокової математичної моделі визначення швидкості та температури частинки з урахуванням вимог до її сфероїдизації плазмовим методом.

В процесі польоту частинка повинна розплавитись, але не перегрітись, затвердіти та досягнути поверхні ємкості для збору порошку, маючи невисоку температуру та швидкість.

Таким чином, спочатку необхідно визначити швидкість частинки, а потім розглянути зміну її температури в процесі польоту з урахуванням зміни її агрегатного стану.

Викладення основного матеріалу дослідження

Процес сфероїдизації порошку титану фракцією 10-20 мкм здійснювали за допомогою ламінарного дугового плазмотрона з додатковим обдуванням плазмового струменя концентричним потоком захисного газу. Потужність плазмотрона складала 5 кВт, продуктивність 1кг порошку за годину із загальною витратою плазмоутворюючого, транспортуючого і захисного газу (аргону) 10л/хв.

На першому етапі розглянемо динаміку руху частинки порошку у плазмовому потоці. На початку дистанції вважаємо, що швидкість частинки дорівнює нулю. Швидкість плазмового потоку до 1000 м/с. В процесі польоту швидкість частинки спочатку зростає, досягає швидкості плазмового потоку, а потім зменшується. Задача полягає в тому, щоб при досягненні поверхні поглинання частинка мала якнайменшу швидкість.

В процесі польоту на частинку діє декілька сил: сила термофорезу, каріолісова сила та інші. В [5] показано, що найбільший вплив на частинку здійснює сила аеродинамічного опору. Виходячи з цього, швидкість частинки вздовж дистанції польоту z може бути визначена з рівняння:

$$m_p W_p \frac{dW_p}{dz} = 0,5 C_D S_p \rho_g (W_g - W_p) |W_g - W_p|, \quad (1)$$

де m_p і W_p — відповідно маса і швидкість частинки, C_D — коефіцієнт аеродинамічного опору; S_p — площа середнього перерізу частинки, ρ_g і W_g — відповідно густина і швидкість газу.

В [5] також показано, що швидкість плазмового потоку досить точно апроксимується експоненціальною функцією.

Оскільки в процесі польоту суттєво змінюються фізико-хімічні характеристики плазми в околі частинки, дистанцію було розбито на ділянки, на кожній з яких ці характеристики вважались сталими.

З урахуванням цього було отримано розв'язки (1) на кожній з ділянок в неявному вигляді. Для частинки титану діаметром 10 мкм маємо, що на дистанції 50 см швидкість її буде меншою за 2 м/с, що є прийнятним при розв'язанні поставленої задачі.

Другим етапом побудови математичної моделі процесу сфероїдизації частинок плазово-дуговим методом є дослідження температурного режиму. Необхідно, щоб у процесі польоту частинка розплавилась, не досягаючи температури випаровування, потім повністю затверділа і досягла поверхні ємкості для збору порошку, маючи досить невисоку температуру. Таким чином, дана задача включає в себе п'ять етапів: нагрів частинки до температури плавлення, процес її плавлення, політ частинки в розплавленому стані, затвердіння та охолодження частинки до моменту досягнення основи поглинання.

На першому етапі ми можемо скористатись моделлю, запропонованою в [6]. Але, оскільки діаметр частинки, а відповідно її маса, майже в сто разів менша від розглянутих у вказаній роботі, то час розігріву до температури плавлення менший за 10^{-5} с. Крім того, частинки порошку мають форму відмінну від сферичної, що суттєво впливає на адекватність даної моделі.

В цьому випадку більш доцільним є визначення температури із рівняння теплового балансу:

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = S_p \alpha (T_g - T_p), \quad (2)$$

де T_p — температура частинки; T_g — температура навколишнього середовища; C_p — питома теплоємність; α — коефіцієнт тепловіддачі від газу до частинки.

Оскільки, розв'язуючи задачу (1), ми отримуємо залежність швидкості частинки від пройденого шляху, а в рівняння (2) входить похідна від температури за часом, необхідно провести узгодження швидкості частинки та плазового потоку від часу перебування в ньому частинки. На думку багатьох авторів, саме час перебування частинки в плазовому потоці є лімітуючим фактором процесу сфероїдизації.

При розв'язанні (1) дистанція польоту частинки розбивалась на ділянки. Час проходження кожної з ділянок знаходимо за формулою:

$$t_j = \int_{z_{j-1}}^{z_j} \frac{dz}{W_p(z)}, \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad z_0 = 0.$$

Підстановка отриманих значень в (2) дає можливість обчислити температуру частинки в залежності від часу її перебування у плазовому потоці. Обчислення закінчуються при досягненні поверхнею частинки температури плавлення.

Далі вважаємо, що на цей момент частинка вже має сферичну форму (час сфероїдизації не перевищує 10^{-6} с). Оскільки теплопровідність металів досить висока, а діаметр частинок малий, то різниця температур на поверхні та в центрі частинки не перевищує 10^0 С, і можна вважати, що потік тепла через границю зміни агрегатних станів відсутній. В цьому випадку час плавлення частинки обчислюється за формулою:

$$\tau_{nl} = \frac{R_k \rho_p \sigma}{3\alpha(T_g - T_{nl})}, \quad (3)$$

де ρ_p — густина частинки, σ — теплота плавлення; T_{nl} — температура плавлення частинки. R_k — радіус твердого ядра.

На етапі польоту частинки в розплавленому стані ми визначаємо її температуру як розв'язок крайової задачі для одновимірного рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} - a^2 \left(\frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} - \frac{2}{r} \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right) = 0, \quad 0 \leq r \leq R,$$

$$\lambda \frac{\partial T(R,t)}{\partial r} = \alpha (T_g(t) - T(R,t)),$$

$$T(0,t) < +\infty,$$

$$T(r,t_0) = T_0 = const,$$
(4)

де $a^2 = \frac{\lambda_p}{c_p \rho_p}$; λ_p – коефіцієнт теплопровідності частинки; R – її радіус, α – коефіцієнт теплообміну між частинкою порошку та газом, $T_g(t)$ – температура плазмового струменя; t_0 – час польоту частинки до моменту повного розплавлення.

Даний підхід виправданий, оскільки частинка має сферичну форму, і температура в кожній її точці залежить лише від відстані її до центру. Розв’язок даної задачі за допомогою апроксимації температури плазмового потоку в околі частинки кубічними сплайнами на кожній з розглянутих ділянок шляху наведено в [8].

На етапі затвердіння частинки обчислюємо час повного затвердіння за формулою (3).

На останньому етапі знаходимо температуру частинки як розв’язок задачі (4), де t_0 – час польоту частинки до моменту повного її затвердіння.

Нами встановлено, що для частинок титану діаметром 10 мкм, швидкість частинки при досягненні поверхні для збору порошку дорівнює приблизно 2-5 м/с, а температура – 500-600⁰С. При цьому максимальна температура частинки в процесі польоту не перевищує 2800⁰С, що нижче за температуру випаровування.

В результаті обробки порошку титану, який був отриманий в процесі гідрування-дегідрування, в потоці термічної плазми аргону, що генерується електродуговим плазмотроном, отримані сферичні порошки титану фракцією 10-20 мкм та менше 10 мкм, ступінь сфероїдизації яких досягає 95%, при цьому середній коефіцієнт округлості частинок складає 1,01 (рис.1).

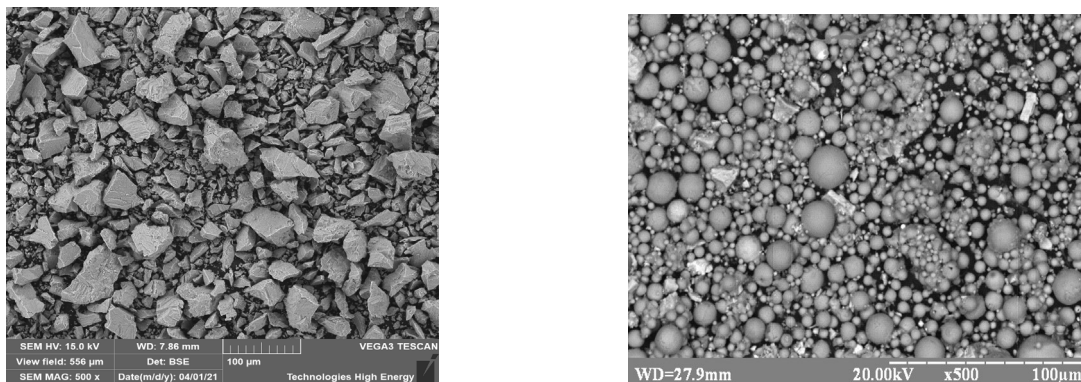


Рис.1. Мікрофотографії порошку титану до і після сфероїдизації

Висновки

Побудована комплексна математична модель визначення швидкості та температури частинки в процесі польоту під час її сфероїдизації плазмово-дуговим методом. Зазначимо, що сила тяжіння не впливає на адекватність моделі, оскільки за час польоту відхилення частинки від осі потоку під її дією становить не більше 0,5 мм. Однак, що стосується задачі (1), то область її застосування обмежена і при діаметрі частинок менше 6 мкм рівень адекватності даної моделі суттєво зменшується, що

пов'язано із збільшенням дії на частинку інших сил, особливо сили термофорезу. Це вимагає подальших досліджень, які планується провести для аналізу динаміки нагріву частинок порошку при сфероїдизації за допомогою плазмових технологій з застосуванням ВЧ та НВЧ плазмотронів, переваги яких зазначені на початку статті.

Список використаної літератури

1. Vert R., Pontone R., Dolbec R., Dionne L., Boulos M.I. Induction plasma technology applied to powder manufacturing: Example of titanium-based materials. *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 704. P. 282–286.
2. Pfender E. Advances in Modeling of the Thermal Spray Process. *Journal of Thermal Spray Technology*. 1997. Vol. 6(2). P. 126–128.
3. Remesh K., Yu S.C.M., Ng H.W., Berndt C.C. Computational Study and Experimental Comparison of the In-Flight Particle Behavior for an External Injection Plasma Spray Process. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2003. Vol. 12(4). P. 508–522.
4. Boulos M. Plasma power can make better powders. *Metal Powder Report*. 2004. Vol. 59. iss. 5. P. 16–21.
5. Андрейцев А.Ю., Смирнов И.В., Чорний А.В. Аналіз динаміки руху дрібнодисперсних частинок при плазмовому напилюванні. *Збірник наукових праць ДЕТУТ*. 2009. №11. С 100–103.
6. Смирнов И.В., Андрейцев А.Ю., Черный А.В. Аналитическое определение скорости и температуры частиц оксидной керамики в процессе плазменного напыления. *Вестник ХНТУ*. 2009. №2(35). С. 403–410.
7. Андрейцев А.Ю., Смирнов И.В., Чорний А.В. Нагрів та плавлення частинок порошку в плазмовому струмені. *Математичне та комп'ютерне моделювання Серія: Технічні науки*. зб. наук. праць Кам'янець-Подільський національний університет, Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова, 2011. Вип.5. С. 3–10.
8. Андрейцев А.Ю., Крюков Н.Н., Смирнов И.В., Защепкина Н.Н. Численно-аналитическое определение температуры частицы при плазменном напылении (уточненная модель). *Вестник ХНТУ*. 2015. №3(54). С.326–331.

References

1. Vert, R., Pontone, R., Dolbec, R., Dionne, L., & Boulos, M.I. (2016). Induction plasma technology applied to powder manufacturing: Example of titanium-based materials. *Key Engineering Materials*. **704**, 282–286.
2. Pfender, E. (1997). Advances in Modeling of the Thermal Spray Process. *Journal of Thermal Spray Technology*. **6**(2), 126–128.
3. Remesh, K., Yu, S.C.M., Ng, H.W. & Berndt, C.C. (2003). Computational Study and Experimental Comparison of the In-Flight Particle Behavior for an External Injection Plasma Spray Process. *Journal of Thermal Spray Technology*. **12**(4), 508–522.
4. Boulos, M. (2004). Plasma power can make better powders. *Metal Powder Report*. **59**, 5, 16–21.
5. Andreytsev, A.Yu., Smyrnov, I.V., & Chornyj, A.V. (2009). Analiz dynamiky rukhu dribnodispersnykh chastynok pry plazmovomu napyliuvanni. *Zbirnyk naukovykh prats DETUT*. **11**, 100–103.
6. Smirnov, I.V., Andreytsev, A.Yu., & Chornyj, A.V. (2009). Analiticheskoe opredelenie skorosti i temperatury chastic oksidnoj keramiki v processe plazmennogo napyleniya. *Vestnik HNTU*. **2**(35), 403–410.

7. Andreytsev, A.Yu., Smyrnov, I.V., & Chorni, A.V. (2011). Nahriv ta plavlennia chastynok poroshku v plazmovomu strumeni. *Matematychni ta kompiuterne modeliuvannia Seriya: Tekhnichni nauky/ zb. nauk. prats Kamianets-Podilskyi natsionalnyi universytet, Instytut kibernetiky im. V.M.Hlushkova*. **5**, 3–10.
8. Andreytsev, A.Yu., Kryukov, N.N., Smirnov, I.V., & Zashchepkina, N.N. (2015). Chislenno-analiticheskoe opredelenie temperatury chasticy pri plazmennom napylenii (utochnennaya model'). *Vestnik HNTU*. **3(54)**, 326–331.

АНДРЕЙЦЕВ Андрій Юрійович – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри вищої та прикладної математики Державного університету інфраструктури та технологій, e-mail: andr7765@i.ua. ORCID: 0000-0003-3969-185X.

СМИРНОВ Ігор Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри смарт технологій з'єднань та інженерії поверхні КПІ ім. Ігоря Сікорського, e-mail: smirnovkpi@gmail.com. ORCID: 0000-0002-1818-7403.

ЧОРНИЙ Андрій Вячеславович – к.т.н, доцент, доцент кафедри смарт технологій з'єднань та інженерії поверхні КПІ ім. Ігоря Сікорського, e-mail: Black803@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7424-0264.

МИНАКОВ Сергій Миколайович – к.т.н, доцент, доцент кафедри смарт технологій з'єднань та інженерії поверхні КПІ ім. Ігоря Сікорського, e-mail: minakovsergey61@gmail.com. ORCID: 0000-0001-8607-4120