

Л.Г. Полонський, к.т.н., доц.,

В.О. Скачков, ст. викл.,

В.Г. Сніцар, доц.

Житомирський державний технологічний університет

МАТЕМАТИЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ РОЗВИТКУ УСТАТКУВАННЯ ТЕХНІКИ НАПИЛЕННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ

На основі багатолітніх досліджень вітчизняних та зарубіжних учених, які займалися проблемами розвитку складних технічних систем, побудовано математичну модель, що дозволяє виявити закономірності розвитку техніки напилення газотермічних покриттів.

Широке впровадження деталей з напиленими газотермічними покриттями (ГТП) в різних галузях виробництва гальмується, в першу чергу, відсутністю якісного серійного устаткування у зв'язку з тим, що сучасні тенденції в машинобудуванні і технологічні вимоги процесів напилення покриттів вимагають розвинених систем механізації та автоматизації, що постає проблема забезпечення виробництва устаткуванням, яке було б найдоцільнішим із економічної точки зору в даних конкретних умовах.

У науковій і технічній літературі широко розглядаються питання конструктивних рішень та характеристики устаткування, але майже відсутні є аналіз і об'єктивна систематизація розвитку напилювальних технічних засобів, відсутня і картина динаміки їх розвитку. Тому спроба математичної інтеграції розвитку устаткування техніки напилення ГТП уявляється своєчасною та необхідною.

Протягом усього часу існування техніки напилення ГТП поліпшення якості покриттів здійснювалося за рахунок вирішення триєдиної задачі – застосування більш досконалих матеріалів, використання ефективнішого устаткування та поліпшення технологічного процесу напилення. Створення ж необхідних умов для здійснення процесу напилення ГТП і забезпечення його параметрів насамперед залежить від устаткування.

Технічні засоби напилення ГТП почали активно розвиватися з 1920-х рр., коли в промисловості виникли проблеми відновлення деталей машин і отримання виробів із якісно новими властивостями.

Найдоцільніше ретроспективно подивитися на розвиток устаткування для напилення ГТП, аналізуючи зміну такого головного параметра, як забезпечувана ним швидкість руху напилюваних часток v_u . Якщо перші зразки тигельного та газового устаткування, створеного швейцарським інженером Шоопом і його послідовниками, дозволяли досягати її у межах $v_u \approx 20$ м/с, то сучасне плазмове і детонаційне устаткування, а також надзвукове газове тощо реалізує швидкості $v_u = 350 \dots 1000$ м/с і більше.

Зростання швидкості напилюваних часток визначило і напрямок розвитку як конструкцій пальників та іншого устаткування певного підкласу, так і техніки напилення ГТП загалом.

Дослідження причин та наслідків зміни швидкості руху напилюваних часток, аналіз низки праць [1–4] дозволили встановити, що її зміна має загальну тенденцію:

- 1) неухильне зростання протягом усієї історії розвитку техніки напилення ГТП;
- 2) повільне зростання протягом 1900–1950 рр.;
- 3) інтенсивне зростання з 50-х рр. ХХ ст. з деяким сповільненням на сьогодні.

Такий характер зміни швидкості напилюваних часток дозволяє зробити припущення, що в цілому процес її зростання можна описати відомим рівнянням Гомперца:

$$y = Le^{-be^{-kt}}, \quad (1)$$

де L , b , k – константи; t – час.

Якісний аналіз конструкцій показує, що інтенсифікація зростання v_u , починаючи з 1902 р., була обумовлена, в першу чергу, появою досконалих систем стиснення та нагнітання газів і поліпшенням конструкцій напилювальних соплових пристроїв, застосуванням у конструкціях устаткування підігрівачів робочих газів і напилюваних матеріалів, інших пристроїв активації процесу нанесення покриття тощо. Поліпшували швидкість руху напилюваних часток, також створюючи устаткування, що забезпечувало відповідне співвідношення кисню та горючого газу в суміші, збільшуючи витрати газу на обдування струменя робочого середовища та прискорення

напилюваних матеріалів, силу струму електричної дуги тощо.

На початок 50-х рр. XX ст. темпи зростання швидкості руху напилюваних часток почали уповільнюватися, не дивлячись навіть на те, що в багатьох країнах (Австрія, Велика Британія, НДР, СРСР, США, ФРН та інші) існувало налагоджене серійне промислове виробництво газового та електричного устаткування для напилення ГТП. Це деякою мірою можна пояснити тим, що можливості тодішніх енергоносіїв – розплавленого металу, продуктів згоряння газової суміші та електричної дуги у поєднанні зі стиснутим газом вичерпали себе.

Збільшення витрат і тиску транспортувального газу викликало відповідно і зростання динамічних навантажень у вузлах та пристроях напилювального устаткування, активація процесу за рахунок різноманітних прискорювачів ускладнила його конструкції, негативно впливаючи і на технологічні можливості. Це спонукало до пошуку такого устаткування, яке працювало б на більш ефективних джерелах теплової енергії.

В 1950–1960 рр. розпочалося використання плазмового устаткування, було здійснено спроби створення надзвукового газового устаткування [1], [3]. Це дозволило стабільно реалізовувати швидкості напилюваних часток вже у межах $v_a \approx 500$ м/с.

Визначення закономірностей розвитку як промисловості в цілому та окремих її галузей, так і тих або інших технічних напрямків завжди передбачає розгляд інтенсифікації зростання кількісних та якісних показників технічних засобів. Це вимагає глибокого розуміння шляхів і напрямків розвитку знарядь праці, які сьогодні, до того ж, мають складну структуру. Відсутність таких знань призводить до неефективного використання знарядь праці у промисловості.

Детальне вивчення унікальної за функціональними, технологічними, антропологічними та іншими критеріями техніки напилення ГТП та їх остаточного формування за допомогою механічної обробки базується на глибокому ретроспективному статистичному аналізі причин і наслідків, які обумовили зміну її параметрів і конструкцій устаткування.

Розвиток технічних галузей відбувається завдяки ліквідації виявлених головних недоліків шляхом поліпшення критеріїв розвитку. Цей процес можливий лише при наявності необхідного науково-технічного рівня та соціально-економічної доцільності і здійснюється він циклічно шляхом вичерпання можливостей досліджуваної техніки наступним чином:

- 1) через наближення до глобального екстремуму значень критеріїв при незмінному фізичному принципі дії;
- 2) після вичерпання можливостей першого циклу відбувається перехід до більш раціонального технічного рішення, і розвиток знову йде за першим циклом.

Перший і другий цикли повторюються до наближення до глобального екстремуму за структурою для даного принципу дії. При цьому значення критеріїв розвитку змінюються у відповідності до S -функції [5], [6]:

$$y(t) = \frac{L}{(a + e^{be^{-\beta t}})}, \quad (2)$$

де a, β – константи, що визначаються за статистичними даними.

Після вичерпання можливостей циклів відбувається перехід до іншого фізичного принципу дії, а подальший розвиток знову йде у відповідності до наведених циклів.

У кожному випадку переходу від одного конструктивного виду до іншого відбуваються зміни в конструкції, які корелюються з характером дефектів конструкції-попередника, а з усіх можливих її змін реалізується найчастіше та, що дає суттєве поліпшення при мінімальних інтелектуальних і виробничих витратах.

Оскільки практично на всіх етапах розвитку техніки напилення ГТП існувала необхідність експлуатації як апаратів, так і постів, установок, верстатів, агрегатів тощо різних фізичних принципів дії, то абсолютні показники росту продуктивності як умовного показника порівняння, зміна характеристик основних складових технічних напилювальних засобів, маси, габаритів і т. д. не можуть чітко і однозначно відобразити загальний процес її розвитку.

Найбільш коректно у такому випадку буде розглядати зміну в часі швидкості руху напилюваних часток протягом існування того або іншого підкласу технічних засобів (або періодів розвитку) техніки напилення ГТП.

Закономірність зміни головних показників різних технічних засобів протягом однієї стадії їх розвитку на сьогодні детально вивчена і відображена в технічній літературі [5], [6].

Стосовно напилювальних засобів, то вичерпання можливостей їх конструктивних видів не діє формально. Тут ми бачимо наступну картину: якщо перехід до нового технічного рішення

або фізичного принципу дії забезпечує отримання додаткової ефективності, то при наявності необхідної науково-технічної бази відбувається стрибок до нового рішення або принципу дії навіть без вичерпання можливостей попередньої конструкції.

Здійснити дослідження закономірностей розвитку напилювальних технічних засобів із метою використання їх на практиці, враховуючи постійний багатofакторний вплив зовнішнього середовища, поки що нереально, але можна прослідкувати еволюцію одного або декількох її головних показників (у нашому випадку – швидкості руху напилюваних часток).

Революційні ж зміни в техніці напилення ГПП – а це переходи на нові, більш ефективні джерела енергії – досліджено на основі вивчення історії розвитку напилювальних технічних засобів. Суттєве та стабільне поліпшення її головних параметрів відбувалося завдяки змінам фізичного принципу дії, з якими практично співпадали і зміни періодів розвитку даної техніки.

Оскільки напилювальні технічні засоби та зміна такого показника, як швидкість руху напилюваних часток досліджені нами найбільш осяжно, то побудову аналітичної моделі розвитку устаткування найдоцільніше здійснити саме на цій базі.

Якщо прийняти за робочу гіпотезу твердження про те, що процес удосконалення будь-якої технічної системи на певній стадії її розвитку можна описати рівнянням S -подібної кривої [5], то ми отримуємо залежність, яка буде у загальному вигляді задовольняти якісні характеристики тієї або іншої стадії.

Як було досліджено раніше, еволюція напилювальних технічних засобів на машинній стадії їх розвитку здійснювалася в напрямку механізації, яка також супроводжувалася і автоматизацією окремих допоміжних операцій. Кінцевим результатом розвитку техніки напилення ГПП на машинній стадії стало створення механізованих напилювальних установок. Кожному періоду розвитку техніки напилення ГПП відповідали свої конструкції технічних засобів, які об'єднував єдиний метод реалізації технологічного процесу напилення покриття.

Наступні конструкції напилювальних технічних засобів базувалися на попередніх досягненнях. Вони поступово завойовували собі переваги завдяки більш високим якісним показникам і витісняли попередні технічні засоби, тим самим забезпечуючи безперервність розвитку техніки напилення ГПП.

Удосконалення напилювальних технічних засобів супроводжувалося як ускладненням, так і, у багатьох випадках, спрощенням конструкцій, як збільшенням їх маси і габаритів, так і зменшенням. Основні параметри – швидкість руху і температура напилюваних часток, продуктивність тощо – також мали тенденцію до поліпшення, але нерівномірною. Причиною цього була необхідність застосування в один і той же історичний період і ручних напилювальних технічних засобів, і механізованих. Також знаходили використання стаціонарні і пересувні апарати, агрегати, лінії тощо.

Апроксимувати зміну швидкості руху напилюваних часток тигельних, газових та електричних напилювальних технічних засобів (пальників) вищенаведеною формулою (1) можна досить точно тільки у тому випадку, коли цей процес терпить зміну протягом однієї стадії розвитку [5]. А моделювання з використанням відповідної кількості рівнянь S -подібних кривих (у нашому випадку використовуємо два рівняння – за кількістю стадій розвитку, а це машинна і автоматична) є більш гнучким, ніж звернення до залежності Гомперца, тому що S -функція має більшу кількість коефіцієнтів.

Побудуємо математичну модель розвитку устаткування. Позначимо через $y = y(t)$ функцію зміни забезпечуваної напилювальними устаткуваннями швидкості руху напилюваних часток від часу.

В реальних умовах виробництва зростання v_u є обмеженим на кожній стадії розвитку, тому виберемо модель у вигляді нелінійного диференціального рівняння, яке апроксимуємо степеневим багаточленом (рівнянням Бернуллі), обмежившись при цьому тільки першими двома членами:

$$\frac{dy}{dt} = a_1(t)y + a_2(t)y^2.$$

Після його розв'язку отримуємо:

$$y(t) = \left[C e^{-\int a_1(t) dt} - e^{-\int a_1(t) dt} \int a_2(t) e^{\int a_1(t) dt} dt \right]^{-1}.$$

Якщо прийняти:

$$a_1(t) \equiv k_1 e^{kt}; \quad a_2(t) \equiv k_2 e^{kt},$$

то отримуємо вираз (2), де $L = \frac{1}{C_1}$; $a_1 = -\frac{k}{k_1 k}$; $b = -\frac{k_1}{k}$; $\beta = -k$.

Розглянемо необхідні і достатні умови, щоб функцію (2) можна було вважати S -функцією розвитку.

Для цього обов'язковим є виконання таких первинних умов:

- 1) $y(t) \geq 0$ для кожного $t \geq 0$;
- 2) $y(t) > 0$ (монотонно зростає);
- 3) $\lim y(t) = y(\infty)$ – кінцеве значення;
- 4) функція $y(t)$ має одну точку перегину на відрізку $(0, +\infty)$.

У [5] показано, що функція (2) є S -функцією тоді і тільки тоді, коли константи L , a , b , β задовольняють умову (для S -функції 1-го типу, якою ми скористаємося надалі): $L > 0$, $b > 0$, $\beta > 0$, $a > -1$; $e^b(b-1) - a(b+1) > 0$.

Наявність статистичних даних щодо зміни v_u протягом 1902–2000 рр. дає можливість за допомогою методу найменших квадратів мінімізувати вираз:

$$\sum (L, a, b, \beta) = \sum_{i=1}^n \left[y_i - \frac{L}{a} + e^{be^{-\beta t}} \right].$$

Спрощений метод обчислення S -функції 1-го типу передбачає, що $L = y(\infty)$. Численними розрахунками встановлено, що параметр $a \approx 0,1$ [5]. Тому мінімізацію функції проведемо тільки за константами b і β .

Позначимо:

$$\bar{m} = \min\{y_i\}; \quad \bar{M} = \max\{y_i\},$$

де $\{y_i\}$ – статистичні дані.

Приведемо рівняння (2) до виду $\frac{L}{y} - a = e^{be^{-\beta t}}$ і прологарифмуємо його:

$$\ln\left(\frac{L}{y} - a\right) = be^{-\beta t} \quad (\text{вираз під знаком логарифма повинен бути позитивним}).$$

Прологарифмуємо отриманий вираз іще раз. Це можна зробити тільки тоді, коли виконується умова $b > 0$.

Отримаємо:

$$\ln \ln\left(\frac{L}{y} - a\right) = \ln b - \beta t.$$

Оскільки для всіх S -функцій 1-го типу $be^{-\beta t} > 0$, то для всіх y

$$\ln\left(\frac{L}{y_i} - a\right) > 0 \quad \text{і} \quad \frac{L}{y_i} - a > 1$$

або

$$\frac{L}{a+1} > y_i.$$

Отже, константи L і a необхідно вибрати такими, щоб $\frac{L}{a+1} > \bar{M} = \max\{y_i\}$.

Зафіксуємо константи L_0 і a_0 таким чином, щоб виконувалося це співвідношення.

Надалі введемо у розв'язок нову змінну:

$$Y_i = \ln \left[\ln \left(\frac{L_0}{y_i} - a_0 \right) \right].$$

Визначимо суму:

$$p(b, \beta) = \sum_{i=1}^n (Y_i - \ln b + \beta t_i)^2,$$

яка є функцією двох змінних.

Знайдемо стаціонарну точку функції з умови рівності нулю часткових похідних:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial b} = -\frac{2}{b} \sum_{i=1}^n (Y_i - \ln b + \beta t_i) = 0; \\ \frac{\partial p}{\partial \beta} = 2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \ln b + \beta t_i) t_i = 0. \end{cases}$$

Таким чином, задача зводиться до розв'язку системи двох лінійних рівнянь із двома невідомими (b і β):

$$\begin{cases} n \ln b - \beta \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n Y_i; \\ \ln b \sum_{i=1}^n t_i - \beta \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n t_i Y_i. \end{cases}$$

Після введення позначень $Q_1 = \sum_{i=1}^n Y_i$; $Q_2 = \sum_{i=1}^n t_i$; $Q_3 = \sum_{i=1}^n t_i Y_i$; $Q_4 = \sum_{i=1}^n t_i^2$ система буде мати вигляд:

$$\begin{cases} n \ln b - \beta Q_2 = Q_1; \\ \ln b Q_2 - \beta Q_4 = Q_3. \end{cases}$$

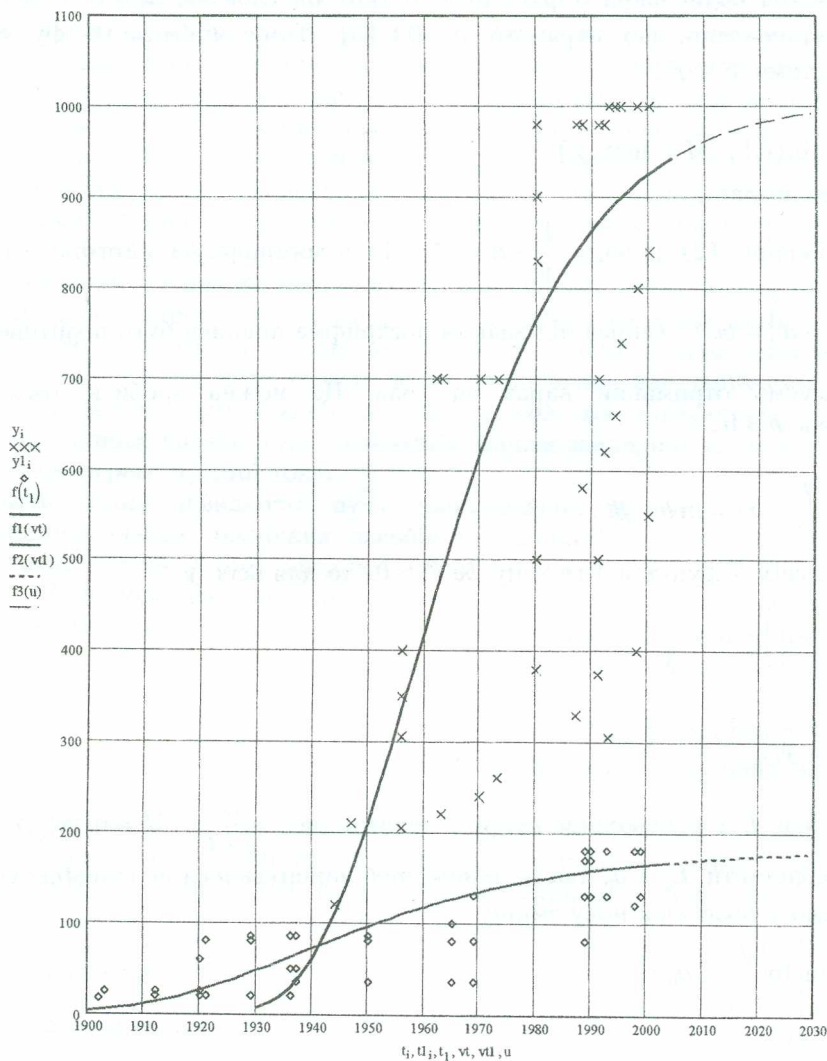


Рис. 1. S-функція розвитку устаткування техніки наповнення ГТП за швидкістю руху наповлених часток (по горизонталі – роки, по вертикалі – v_w м/с)

Алгоритм обчислень реалізуємо за допомогою формул Крамера в пакеті MathCAD [7], а результати подамо в табл.

Таблиця

Розраховані значення констант S-функції

Стадія розвитку	L	a	b	β
Машинна	185	0,01	4,099	0,037
Автоматична	1060	0,05	2,261	0,058

Аналітичний вираз (2) та його графічна інтерпретація (рис. 1) дозволяють проаналізувати стадії розвитку техніки напилення ГПП і зробити деякі висновки.

Перша стадія – зняття – суттєвого впливу на подальший розвиток не мала (тому для неї розрахунок констант не здійснювався). Її існування обмежується серединою XVI ст., тобто появою активної фази наступної стадії – машинної, впродовж якої до початку 1900-х рр. ця техніка практично не зазнавала якісних змін [8].

Форма кривої S-функції об'єктивно відображає можливості устаткування техніки напилення ГПП на машинній стадії її розвитку. Елементи цього устаткування беруть свій початок зі зняття, а їх ефективність поступово поліпшується. Апроксимація S-функцією статистичних даних, які відображають зміну швидкості руху напилюваних часток, показує, що в 1902 р. вона в середньому дорівнювала $v_c \approx 20$ м/с, а в 2000 р. – $v_c = 180$ м/с.

На третій – автоматичній – стадії розвитку продовжується існування устаткування попередньої стадії, але темпи зростання його головного параметра уповільнюються (з 1950 р. по 2000 р. швидкість руху напилюваних часток зростає тільки в 2,25 рази). Нове ж устаткування третього покоління – плазмове, детонаційне, газове „ракетної дії” та надзвукове, високошвидкісне електричне тощо – дало приріст швидкості напилюваних часток майже в 17 раз (хоча при зростанні v_c приблизно в 70 раз міцність зчеплення покриття з основою з 1900 р. по 2000 р. поліпшилася всього в 4 рази – від 50 МПа до 200 МПа [9]).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справ. / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. – К.: Наук. думка, 1987. – 544 с.
2. Катиц Н.В. Металлизация распылением. – Харьков: ХДТ, 1940. – 87 с.
3. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. – М.: Машиностроение, 1985. – 239 с.
4. Шестерненко В.И. Детонационное нанесение покрытий // Порошковая металлургия. – 1968. – № 1. – С. 37–47.
5. Каменев А.Ф. Технические системы: закономерности развития. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 216 с.
6. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
7. Очков В. Советы пользователям MathCAD 2001. – М.: МЭИ, 2001 (www.ozon.ru).
8. Полонский Л.Г. Газовая техника ГПП: от возникновения до сегодня // Плёнки и покрытия' 2001: Матер. 6-й Междунар. конф., 3–5 апреля 2001 г., г. Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – С. 45–47.
9. Теория и практика газопламенного напыления / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, Е.Д. Манойло и др. – Минск: Наука и техника, 1993. – 295 с.

ПОЛОНСЬКИЙ Леонід Григорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- обробка різанням напилених газотермічних покриттів;
- історія техніки напилення газотермічних покриттів.

СКАЧКОВ Володимир Олександрович – старший викладач кафедри програмного забезпечення та обчислювальної техніки Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- штучний інтелект;
- бази знань та експертні системи.

СНІЦАР Володимир Григорович – доцент кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- системи технологій.