

ФОРМАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОШУВАННЯ СОПЕЛ АБРАЗІВНО-ПОВІТРЯНИМ СТРУМЕНЕМ НА ОСНОВІ МЕТОДУ АНАЛІЗУ РОЗМІРНОСТЕЙ

© Стоцько З.А., Стефанович Т.О., Шептицький Б.П., 2010

Проаналізовано фактори, від яких залежить зношення сопел абразивно-струменевих установок ежекційного типу. Встановлено, що максимально впливає на інтенсивність процесу зношення внутрішньої поверхні сопла здійснює швидкість абразивно-повітряного струменя.

Factors, from which wearing nozzles of abrasive-jet equipment is depend on, are under consideration. The rate of moving abrasive-air jet through the nozzle impacts on wearing of the internal surface of the nozzle the most intensively.

Постановка проблеми. Методи абразивно-струминного оброблення знаходять широке і різнопланове використання у виробництві. Вони можуть застосовуватися для очищення виробів від бруду, окалини, ґрату; декоративного оброблення поверхонь з метою надання їм привабливого зовнішнього вигляду; підвищення втомної міцності деталей машин; механічного оброблення поверхонь виробів складної конфігурації; різання листового матеріалу струменем абразиву для отримання виробів з криволінійними і складними контурами [1].

Для досягнення високої продуктивності під час абразивно-струминного оброблення необхідно підтримувати всі вузли обладнання в робочому стані. Одним із найважливішим вузлів абразивно-струминної установки, від ефективної роботи якого залежить продуктивність установки, формування необхідних енергетичних показників струменя, а також екологічна безпека проведення процесу, є сопло – деталь абразивно-струминної головки. Канал сопла повністю визначає форму струменя. Наприклад, прямий канал створює компактний струмінь, який доцільно використовувати для оброблення виробів невеликих розмірів. Канал Вентурі збільшує швидкість руху абразиву в струмені. Такий струмінь може ефективно використовуватися для підвищення втомної міцності деталей машин. Щілинне сопло формує широкий і тонкий струмінь, який забезпечує швидке очищення поверхонь великої площі [2, 3].

Неправильний вибір матеріалу сопла скорочує термін його експлуатації. Швидке зношення сопла веде до втрати тиску робочого середовища у струмені і зниження продуктивності абразивно-струминної установки. Надмірна шорсткість внутрішньої поверхні сопла, так званий ефект «апельсинової шкірки», спричиняє турбулізацію струменю, зменшення швидкості його руху, нерівномірний розподіл робочого середовища у поперечних перерізах струменя і погіршує показники якості оброблюваної поверхні. Експлуатація зношеного сопла в складі абразивно-струминної установки є небезпечною для здоров'я обслуговуючого персоналу.

У зв'язку з цим актуальним завданням є розроблення рекомендацій для раціонального вибору розмірів і матеріалу сопел абразивно-струминних установок; визначення критеріїв для встановлення критичного рівня зношення сопла; створення діагностичного інструментарію для визначення часу заміни зношеного сопла.

Поставлені завдання можна частково вирішити шляхом побудови математичних моделей процесу зношення сопел абразивно-повітряним струменем, розробленням на їх основі прикладного програмного забезпечення, яке дасть змогу розрахувати тривалість заміни зношеного сопла залежно від матеріалу і розмірів сопла, фізичних і енергетичних характеристик робочого середовища.

Аналіз літературних джерел [2, 4– 6] вказує на те, що як на теренах України, так і за її межами проводиться велика кількість експериментальних досліджень технологічних процесів абразивно-струминного оброблення, спрямованих на розв’язання конкретних прикладних задач.

Основні підходи до теоретичного описання і дослідження процесів абразивно-струминного оброблення заклав О.Є. Проволоцький. Він запропонував залежність, яка дає змогу наближено оцінити залежність величини лінійного зняття матеріалу від параметрів оброблення; проведено імітаційне моделювання контактної взаємодії одиничного тіла із оброблюваною поверхнею для дослідження зміни лінійних розмірів поверхні та шорсткості під час абразивно-струминного оброблення; описано різноманітні конструкції абразивно-струминних головок, проаналізовано форму і властивості струменів, які ними формуються [4]. У монографії [5] автори провели глибокий і смісний аналіз процесів струминно-абразивного оброблення з використанням надвисоких тисків і запропонували новий комплексний підхід у теорії гідрорізання; викладено основні принципи конструювання гідрорізального обладнання. Автор [2] під час встановлення необхідності заміни сопла запропонував використовувати калібр-пробку для вимірювання ступеня зношування сопла. Сопло рекомендується замінити, якщо його діаметр збільшився на 1,6–3,2 мм порівняно з номінальним. Детально різні конструкції сопел та аналіз їх переваг та недоліків наведено в [6].

На основі проведеного аналізу наукових напрацювань і здобутків у галузі абразивно-струминного оброблення можна зробити висновок, що процеси зношування сопел повітряно-абразивним струменем є доволі складними. Єдиної теорії проходження цих процесів сьогодні не розроблено, тому потреба в подальших теоретичних і експериментальних дослідженнях є очевидною.

Постановка задачі досліджень. Метою дослідження є визначення факторів, які визначають процес руйнування матеріалу сопла в зоні дії абразивно-повітряного струменя, взаємозв’язок між ними та ступінь їх впливу на інтенсивність зношування; окреслення методики проведення експериментальних досліджень з метою отримання регресійних математичних моделей зношування сопел. Поставлене завдання можна вирішити із застосуванням принципів теорії подібності, положень математичної статистики, методу аналізу розмірностей.

Основний зміст і результати роботи. Схему руйнування матеріалу сопла абразивно-повітряним струменем показано на рис. 1.

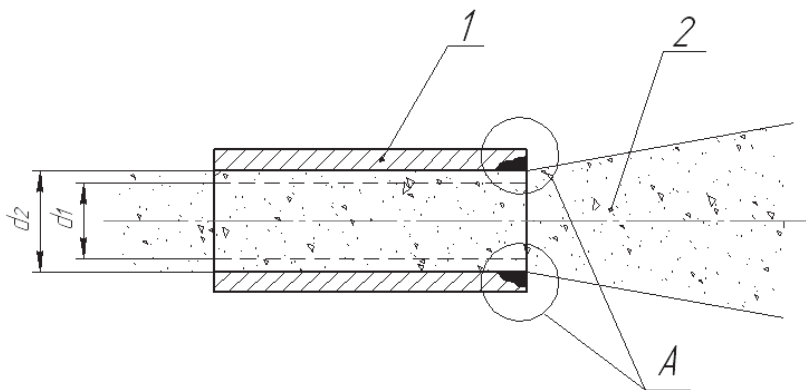


Рис. 1. Схема руйнування матеріалу сопла круглого перерізу абразивно-повітряним струменем:

1 – сопло, 2 – абразивно-повітряний струмінь;

А – зони найінтенсивнішого зношування внутрішньої поверхні сопла;

d_1 , d_2 – внутрішній та зовнішній діаметри шару абразиву, який взаємодіє з поверхнею сопла

Струмінь 2 з великою швидкістю проходить крізь сопло 1 круглого перерізу. Абразивний матеріал у струмені розганяється стиснутим повітрям завдяки явищу ежекції. Під час тертя зерен абразиву об внутрішню поверхню сопла відбувається відривання частинок матеріалу сопла

внаслідок мікрорізання, захоплення їх струменем і винесення за межі сопла. Як показує аналіз зразків зношених сопел, найінтенсивніше внутрішня поверхня сопла зношується в зонах А. Це спричинено швидким розширенням струменя, яке відбувається під час його виходу у повітряне середовище внаслідок перепаду тиску (рис. 1).

Формалізуємо досліджуваний процес зношування внутрішньої поверхні сопла шляхом введення початкових припущень. У першому наближенні розглядатимемо стаціонарний струмінь із рівномірним розподілом зерен абразиву в поперечному перерізі та сталою швидкістю руху через сопло. Зерна абразиву моделюватимемо кульками.

Фактори, що визначають руйнування поверхні сопла, містять багато контрольованих і неконтрольованих параметрів. Виділимо серед них основні і подамо досліджуваний процес у вигляді блок-схеми (рис. 2).

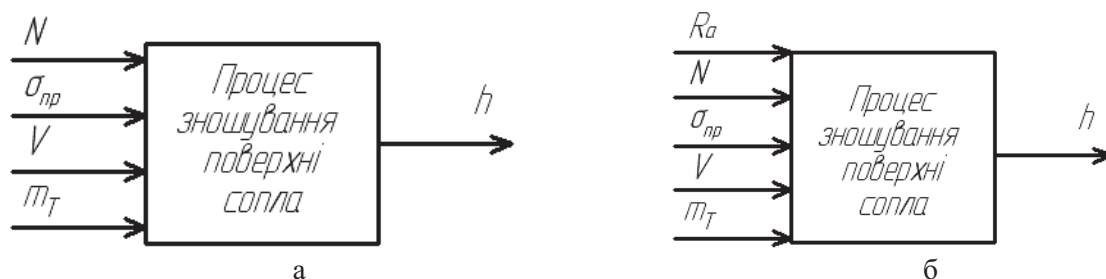


Рис. 2. Подання процесу зношування сопла абразивно-повітряним струменем у вигляді блок-схеми: а – без врахування шорсткості поверхні;

б – з врахуванням шорсткості поверхні; N – маса абразиву, яка бере участь у руйнуванні поверхні; V – швидкість руху абразиву крізь сопло; m_T – середня маса зерен абразиву; σ_{np} – межа пружності матеріалу сопла; R_a – шорсткість поверхні; h – інтенсивність зношування сопла

Як вихідний параметр, який характеризує інтенсивність зношування, будемо розглядати величину зміни діаметра сопла за одиницю часу h . Як керуючі фактори процесу зношування сопла виділимо масу абразиву, яка бере участь у руйнуванні поверхні N ; швидкість руху абразиву крізь сопло V ; середню масу зерен абразиву m_T ; межу пружності матеріалу сопла σ_{np} і шорсткість поверхні R_a .

Обґрунтуємо вибір саме таких керуючих факторів, проаналізувавши кожен із них окремо.

Для визначення маси абразиву, яка проходить крізь розглядуваний кільцевий переріз, із всього потоку абразиву виокремимо тільки той шар, який знаходиться в зоні біля внутрішньої поверхні сопла і безпосередньо взаємодіє з нею. На рис. 1 він показаний штриховою лінією. В перерізі цей шар має форму кільця із зовнішнім діаметром, що дорівнює діаметру сопла d_c . Внутрішній діаметр кільця залежить від розміру абразивних зерен:

$$d_1 = d_c - 2 \cdot d_T, \quad (1)$$

де d_c – діаметр сопла, м; d_T – середній діаметр абразивного зерна, м.

Маса абразиву, яка проходить через розглядуваний кільцевий переріз за одиницю часу, залежить від геометричних параметрів перерізу та від продуктивності абразивно-струминної установки і може бути обчислена за формулою:

$$N = \frac{4 \cdot Q \cdot d_T \cdot (d_c - d_T)}{d_c^2}, \quad (2)$$

де Q – продуктивність абразивно-струминної установки, кг/с.

Отже, керуючий фактор N залежить від продуктивності абразивно-струминної установки і геометричних параметрів сопла, які можна виміряти безпосередньо перед проведенням експериментальних досліджень.

Швидкість руху абразиву V у кільцевому перерізі, враховуючи припущення про стаціонарність струменя та сталість швидкості по всьому поперечному перерізу, можна обчислити за рівнянням нерозривності потоку:

$$V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_c^2}. \quad (3)$$

Середня маса зерен абразиву m_T залежить від розмірів зерна та густини матеріалу і може бути обчислена за відомою формулою:

$$m_T = \rho_T \cdot \frac{\pi \cdot d_T^3}{6}, \quad (4)$$

де ρ_T – густина матеріалу абразиву, кг/м³.

Під час тертя зерен абразиву об внутрішню поверхню сопла зношування відбувається в тому випадку, коли матеріал поверхні пластично деформується, тобто напруження в підповерхневих шарах внутрішньої частини сопла перевищать межу пружності матеріалу сопла σ_{np} . Введемо до математичної моделі межу пружності як керуючий фактор, за яким враховуватимемо властивості матеріалу сопла.

На основі блок-схем (рис. 2) можемо записати зв'язок між керуючими і вихідними факторами, які визначають процес зношування сопла:

$$h = f(N, \sigma_{np}, V, m_T); \quad (5)$$

$$h = f(N, \sigma_{np}, V, m_T, R_a). \quad (6)$$

З математичної статистики відомо, що кількість дослідів, яку необхідно провести, щоб отримати закономірність, яка достовірно описує фізичні явища, визначається за формулою:

$$n = \sigma^k, \quad (7)$$

де σ – кількість експериментів, яку необхідно провести для забезпечення адекватності математичної моделі, отриманої на основі експериментальних даних: мінімальне рекомендоване значення σ дорівнює 5; k – кількість керуючих факторів, які враховуються в моделі.

Для отримання математичної моделі за залежністю (5) необхідно провести як мінімум 625 експериментів. Під час введення до математичної моделі додаткового керуючого фактора – шорсткості поверхні сопла R_a , як це має місце в залежності (6), – кількість експериментів зростає до 3125.

Для зменшення кількості експериментів скоротимо кількість керуючих факторів, які будемо враховувати під час дослідження процесу зношування сопла, скориставшись методом аналізу розмірностей [6]. Опишемо досліджуваний процес безрозмірними комплексами-критеріями подібності π . Запишемо керуючі фактори та їх розмірності у таблиці.

Керуючі фактори процесу зношування сопла абразивно-повітряним струменем та їх розмірності

№ з/п	Назва	Позначення	Розмірність
1	Показник зношування	h	$L \cdot T^{-1}$
2	Межа пружності	σ_{np}	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$
3	Продуктивність	N	T^{-1}
4	Швидкість	V	$L \cdot T^{-1}$
5	Маса	m_T	M

Нехай шукана математична модель після обробки експериментальних даних буде отримана у вигляді степеневі функції:

$$h = f(N^a, \sigma_{np}^b, V^c, m_T^d). \quad (8)$$

Підставивши в (8) розмірності з табл. 1, використаємо теорему Букінгема для забезпечення однорідності рівнянь відносно їх розмірностей та об'єднаємо члени з однаковими показниками степеня:

$$\frac{h \cdot \sigma_{np}}{N^3 \cdot m_T} = f\left(\frac{\sigma_{np} \cdot V}{N^3 \cdot m_T}\right) \quad (9)$$

Замість чотирьох керуючих факторів, як у залежності (5), отримуємо тільки два фактори у вигляді безрозмірних комплексів (рис. 3, а). Отже, кількість експериментів, яку необхідно провести для отримання математичної моделі зношування сопла, зменшилася із 625 до 25. Експерименти полягатимуть у встановленні залежності інтенсивності зношування сопла абразивно-повітряним струменем від швидкості його руху. Змінювати швидкість під час експерименту можна зміною діаметра сопла або продуктивності абразивно-струминної установки і обчислювати за формулою (3).

Під час врахування в математичній моделі шорсткості поверхні степенева функція (8) набуде вигляду:

$$h = f(N^a, \sigma_{np}^b, V^c, m_T^d, R_a^e). \quad (10)$$

Скориставшись методом аналізу розмірностей для зменшення кількості експериментів, можемо описати процес зношування сопла абразивно-повітряним струменем безрозмірними критеріями:

$$\frac{h \cdot \sigma_{np}}{N^3 \cdot m_T} = f\left(\frac{V \cdot \sigma_{np}}{N^3 \cdot m_T}, \frac{R_a \cdot \sigma_{np}}{N^2 \cdot m_T}\right). \quad (11)$$

Замість п'яти керуючих факторів, як у залежності (6), отримуємо три фактори у вигляді безрозмірних комплексів (рис. 3, б). Експерименти полягатимуть у встановленні залежності інтенсивності зношування сопла абразивно-повітряним струменем від швидкості його руху та шорсткості поверхні. Отже, кількість експериментів, яку необхідно провести для отримання математичної моделі зношування сопла, із врахуванням у ній шорсткості поверхні, зменшилася із 3125 до 125.

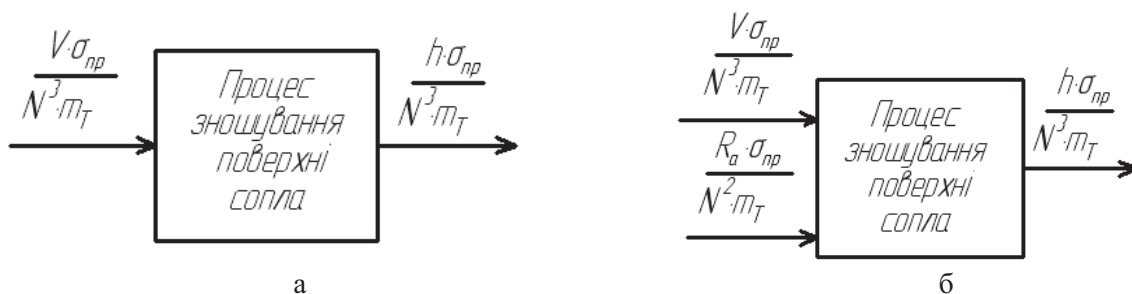


Рис. 3. Блок-схеми процесу зношування сопла абразивно-повітряним струменем, подані у вигляді безрозмірних критеріїв-комплексів подібності π : а – без врахування шорсткості поверхні сопла, б – з врахуванням шорсткості поверхні сопла

Хоча шорсткість поверхні R_a є важливим параметром, але вона важко контролюється, і її введення в математичну модель збільшує кількість експериментів у 5 разів, тому під час проведення експериментальних досліджень її враховувати не будемо. Математичну модель можна представити на основі формули (9) як залежність інтенсивності зношування сопла абразивно-повітряним струменем h від швидкості його руху через сопло V .

Висновки. 1. Правильний вибір матеріалу сопла абразивно-струминної головки і дотримання оптимальної тривалості його роботи до заміни в зв'язку із зношуванням дають змогу досягати високої продуктивності та рівномірності оброблення поверхонь виробів, гарантує безпеку обслуговуючого персоналу.

2. Інтенсивність зношування внутрішньої поверхні сопла абразивно-струминної установки залежить від її продуктивності; форми і маси абразивних зерен; швидкості їх руху через сопло; матеріалу, з якого виготовлене сопло, та шорсткості його внутрішньої поверхні.

3. Використання методу аналізу розмірностей показало, що основним керуючим фактором, від якого залежить інтенсивність проходження процесу зношування внутрішньої поверхні сопла, і який доцільно враховувати в першу чергу під час математичного моделювання процесу, є швидкість абразивно-повітряного струменя. Також це дало змогу скоротити кількість експериментів, необхідних для отримання регресійної математичної моделі процесу зношування сопла, майже в 23–26 разів.

4. Надалі планується проведення експериментальних досліджень, які дадуть змогу, використовуючи запропоновану у статті методику, отримати математичні моделі зношування сопел абразивно-повітряним струменем.

1. Стоцько З.А., Стефанович Т.О. Побудова і дослідження розподілу швидкостей робочого середовища при струминній обробці поверхонь виробів // ДонНТУ Міжнародний зб. наукових праць: Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2006. – № 32. – С. 212–220. 2. Когда менять сопло. Техобслуживание оборудования // Очистка. Окраска. – Екатеринбург: Оригами, 2006. – № 32. – С. 24. 3. Стоцько З.А. Автоматизація технологічного процесу виготовлення виробів електронної техніки з нанесенням покриттів методом напилення: Дис. ...д-ра техн. наук. – Львів: ДУЛП, 1996. – 324 с. – Машинопис. 4. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. – К.: Техника, 1989. – 177 с. 5. Саленко О.Ф., Струтинський В.Б., Загірняк М.В. Ефективне гідрорізання: Монографія. – Кременчук: КДПУ, 2005. – 488 с. 6. Билик Ш.М. Абразивно-жидкостная обработка металлов. – М.: Машигиз, 1960. – 196 с. 7. Стоцько З.А. Моделювання технологічних систем: Навч. посібник. – К.: НМК ВО, 1992. – 132 с.