

ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ СТРУМЕНЕВОЇ ОБРОБКИ КРИВОЛІНІЙНИХ ПОВЕРХОНЬ ВИРОБІВ

О Стоцько З.А., Стефанович Т.О., 2021

Мета. Розробити підхід для визначення режимів струменевої обробки криволінійних поверхонь виробів з метою забезпечення рівномірної обробки, що може бути досягнуто за умов дотримання постійної відстані від торця сопла до поверхні та дотримання перпендикулярності осі сопла до твірної криволінійної поверхні у точці обробки шляхом переміщення оброблюваної поверхні і зміною нахилу сопла. **Методика.** Для опису оброблюваної криволінійної поверхні застосовано базові положення аналітичної геометрії на площині. Для дослідження руху оброблюваної криволінійної поверхні використано базові положення теоретичної механіки, а саме кінематичні рівняння руху матеріальної точки. Побудову графічних залежностей та аналіз отриманих результатів здійснено з використанням математичного редактора. **Результати.** Результатом є математичний апарат, використання якого в системах керування технологічним обладнанням дозволить забезпечити рівномірну обробку криволінійних поверхонь шляхом регулювання лінійної швидкості переміщення поверхні виробу та кутової швидкості нахилу сопла струменевого апарату, і, таким чином, забезпечити необхідну точність та якість виробів. **Наукова новизна.** Удосконалено підхід для моделювання струменевої обробки виробів із криволінійними поверхнями, а саме запропоновано метод визначення режимів обробки за умов постійної відстані від торця сопла до поверхні та перпендикулярності осі сопла до дотичної у точці обробки. Аналітично отримано вирази для математичного описання криволінійних поверхонь залежно від їх форми та характеру руху. **Практична значущість.** Запропонований підхід рекомендується використовувати у технологічних процесах струменевої обробки для виробів складної конфігурації, під час проектування вузлів технологічного обладнання або пристроїв, призначених для забезпечення руху виробу або інструменту. Математичні моделі можуть бути основою для забезпечення показників якості криволінійних поверхонь виробів, отриманих в результаті струменевої обробки.

Ключові слова: струменева обробка, технологічне обладнання, режими обробки, криволінійна поверхня, рух виробу.

Вступ. Постановка проблеми

Будь-яке машинобудівне виробництво потребує продуктивних і дешевих методів обробки металевих деталей, які в подальшому стануть складовими технологічного обладнання. До таких методів відноситься група методів, об'єднаних спільною назвою «струменева обробка», в яких як інструмент використовуються багатофазні струмені. Залежно від фізичної природи та кількості фаз розрізняють методи обробки сухим абразивом або дробом, методи обробки мокрим абразивом або дробом, методи з використанням кавітації у рідкій фазі, обробку затопленими струменями тощо. Перелічені методи можуть застосовуватися як на завершальних операціях технологічного процесу, наприклад, для зміцнення або декоративного оздоблення поверхонь виробів, так і в підготовці поверхонь до подальшої обробки, зокрема, до операцій із нанесення покриттів. Переваги струменевої обробки особливо проявляються із збільшення розмірів та ускладненням форми виробів, роблячи її подекуди безальтернативним методом для досягнення бажаних показників якості поверхонь виробів.

Однією з базових вимог до будь-якого методу обробки є прогнозованість точності та якості виробів, отриманих після застосування цього методу. Правильне встановлення технологічних режимів може гарантувати забезпечення результатів струменевої обробки. Однак необхідність врахування значної кількості вхідних даних, а саме параметрів обладнання, струменя, робочого середовища, фізико-механічних властивостей матеріалу та форми оброблюваних поверхонь виробів, а також відсутність чітких рекомендацій та експериментальних даних, особливо у випадку струменевої обробки криволінійних поверхонь, суттєво ускладнюють цей процес. Тому актуальним

завданням є математичне моделювання струменевої обробки криволінійних поверхонь виробів з використанням систем автоматизованих розрахунків. Результати математичного моделювання ляжуть в основу конструкторсько-технологічних рішень для виробництв, у яких впроваджується або використовується струменева обробка.

Аналіз літературних джерел

Під час аналізу літературних джерел виявлено значну кількість експериментальних досліджень для різних методів струменевої обробки. Метою цих досліджень було розв'язання конкретних прикладних задач, пов'язаних із обробкою певних марок матеріалів [1-4]. На теренах України основи теоретичних досліджень струменевої обробки закладені у монографії [5] та набули розвитку у роботах [6, 7].

Математичне моделювання струменевої обробки з використанням енергетичної концепції детально розглянуто у [8]. В основі енергетичної концепції лежить закон збереження енергії, за яким енергія, надана струменю робочого середовища, за винятком втрат на різних етапах обробки, перетворюється в роботу із зміни форми та напруженого стану поверхні виробу. Визначення розподілу маси робочого середовища вздовж траєкторії руху оброблюваної поверхні за змінних режимів обробки для випадків руху струменя вздовж плоскої нерухомої поверхні та по радіусу поверхні планшайби, яка обертається, описано у [9]. Аналітичні залежності для визначення кута атаки струменя робочого середовища для будь-якої точки поверхні під час обробки нерухомим струменем виведено у [10]. Змодельовано зміну кута атаки для випадків обробки плоских поверхонь ударним і ковзним струменями, для перерізів кульової та циліндричної поверхонь, криволінійних поверхонь довільної форми, заданих відповідними рівняннями кривих.

Проведений аналіз наукових напрацювань дозволяє визначити ряд задач, для розв'язання яких потрібні подальші теоретичні дослідження, зокрема є потреба у визначенні режимів струменевої обробки за умови рівномірного впливу на всю криволінійну поверхню виробу шляхом її переміщення.

Мета дослідження

Розробити підхід для визначення режимів струменевої обробки криволінійних поверхонь виробів з метою забезпечення рівномірної обробки, що може бути досягнуто за умов дотримання постійної відстані від торця сопла до поверхні та дотримання перпендикулярності осі сопла до твірної криволінійної поверхні у точці обробки шляхом переміщення оброблюваної поверхні і зміною нахилу сопла.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі.

1. Формалізувати процес струменевої обробки криволінійної поверхні виробу.
2. Побудувати математичні моделі для визначення режимів обробки.
3. Виконати кількісну оцінку режимів обробки, що забезпечують рівномірну обробку по всій криволінійній поверхні в процесі її переміщення відносно сопла струменевого апарату.

Побудова математичних моделей

Формалізація процесу струменевої обробки криволінійної поверхні виробу.

Суть струменевої обробки полягає у впливі на оброблювану поверхню багатофазним струменем. Струмінь, взаємодіючи з поверхнею, змінює її стан, модифікуючи, видаляючи поверхневі шари матеріалу або чинячи комбінований вплив.

Схема струменевої обробки криволінійної поверхні показана на рис. 1. Соплом 1 струменевого апарату формується багатофазний струмінь 2. Робоче середовище струменя рухається до криволінійної поверхні 3 із великою швидкістю. Обробка виконується в зоні контакту робочого середовища струменя 2 із поверхнею 3.

Проте при обробці виробу з криволінійною поверхнею при його переміщенні відносно сопла

змінюватимуться як відстань L від сопла до поверхні, так і кут атаки струменя β . Це викликає зміну режиму обробки і, відповідно, нестабільність параметрів оброблюваної поверхні.

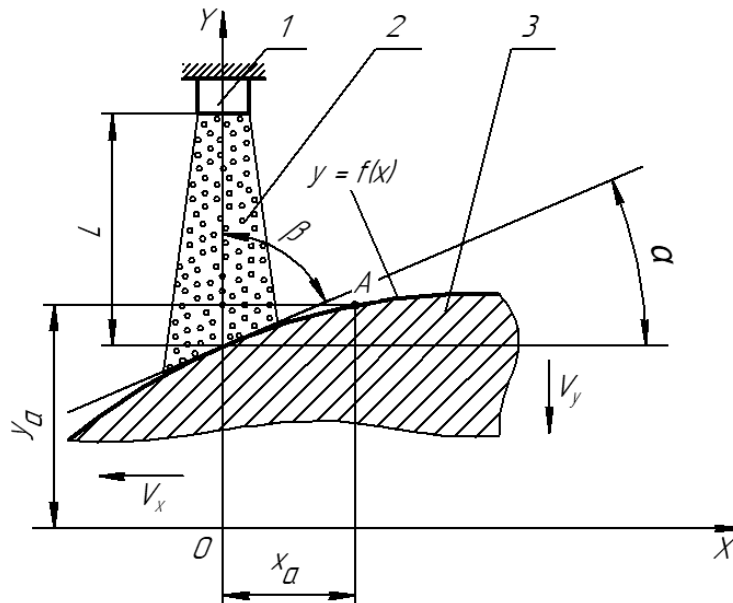


Рис. 1. Схема струменевої обробки криволінійної поверхні для умов $L = \text{const}$, $\alpha \neq \text{const}$, $\beta \neq \text{const}$: 1 — сопло, 2 — струмінь, 3 — поверхня; L — відстань від торця сопла до поверхні, α — кут нахилу твірної поверхні до осі OX , β — кут атаки струменя, V_x , V_y — швидкості переміщення перерізу поверхні по осях OX та OY

Fig. 1. Scheme of jet processing of a curved surface for $L = \text{const}$, $\alpha \neq \text{const}$, $\beta \neq \text{const}$:

1 — nozzle, 2 — jet, 3 — surface; L — distance from the nozzle to the surface, α — angle of surface inclination, β — impingement angle, V_x , V_y — velocity of the surface movement along the axes OX and OY

Для забезпечення стабільності режиму обробки вісь сопла струменевого апарату 1 повинна постійно залишатися перпендикулярною до твірної оброблюваної поверхні, тобто кут атаки струменя $\beta = 90^\circ$ (рис. 2), а відстань від торця сопла до поверхні повинна бути постійною ($L = \text{const}$). Для виконання цих умов сопло струменевого апарату повинне здійснювати колильний рух з кутовою швидкістю ω по дуговій траєкторії. Положення осі сопла визначається кутом α нахилу твірної до осі OX .

Переріз криволінійної поверхні 3 задається на площині рівнянням $y = f(x)$. Під час обробки переріз здійснює плоскопаралельний рух, який складається із поступальних рухів відносно осей OX та OY . Швидкість руху відносно осі OX позначимо як V_x , відносно осі OY як V_y .

Побудова математичних моделей для визначення режимів обробки.

Розглянемо випадок обробки криволінійної поверхні за схемою, показаною на рис. 1. Оброблювана поверхня переміщується із постійною швидкістю V_x відносно осі OX . Необхідно визначити швидкість руху поверхні V_y відносно осі OY за умови забезпечення постійної відстані L від торця сопла до поверхні.

За геометричними побудовами (рис. 1) знайдемо, як співвідносяться між собою V_x та V_y з прив'язкою до форми криволінійної поверхні. Форму криволінійної поверхні можна задати кутом α нахилу твірної поверхні до осі OX . Значення α визначимо як $\text{tg} \alpha = \frac{dy}{dx}$.

Лінійну швидкість V_x подамо як похідну по координаті x від часу t : $V_x = \frac{dx}{dt}$, звідки $dx = V_x dt$.

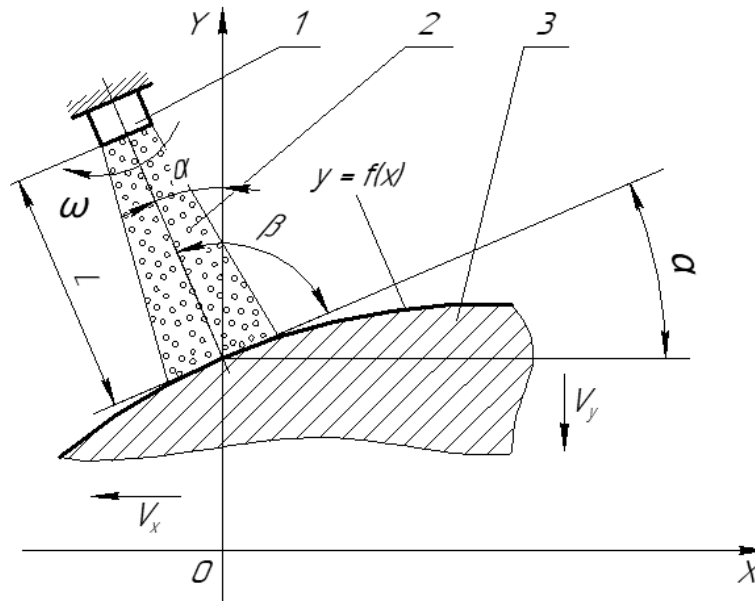


Рис. 2. Схема струменевої обробки криволінійної поверхні для умов $L = \text{const}$, $\alpha \neq \text{const}$, $\beta = 90^\circ$:

ω — кутова швидкість сопла

Fig. 2. Scheme of jet processing of a curved surface for $L = \text{const}$, $\alpha \neq \text{const}$, $\beta = 90^\circ$:

ω — nozzle angular velocity

Підставимо dx в формулу для визначення $\text{tg}\alpha$. Отримаємо:

$$\text{tg}\alpha = \frac{dy}{V_x dt},$$

або

$$\text{tg}\alpha = \frac{V_y}{V_x}.$$

Таким чином, отримуємо співвідношення між лінійними швидкостями V_x і V_y :

$$V_y = V_x \text{tg}\alpha,$$

або

$$V_y = V_x \frac{df(x)}{dx}. \quad (1)$$

Для часткового випадку, коли поверхня виробу є площиною, $\alpha = 0$, швидкість V_y буде рівною 0, що відповідає дійсності, тобто виріб у поперечному напрямку не переміщується.

Використовуючи (1), можна визначати швидкість руху поверхні V_y відносно осі ОУ за умови попередньо заданої V_x та забезпечення постійної відстані L від торця сопла до поверхні.

Розглянемо як математично описати криволінійну поверхню залежно від її форми та характеру руху. Для нерухомої поверхні, коли швидкості $V_x = 0$ та $V_y = 0$, рівняння поверхні в перерізі матиме вигляд $y = f(x)$. За здійснення поверхнею переміщення, коли $V_x \neq 0$ та $V_y \neq 0$, рівняння набуде вигляду $y = f(x, t)$.

Для довільної точки А (рис. 1), яка лежить на криволінійній поверхні і рухається поступально вздовж осей ОХ та ОУ, можемо записати рівняння її руху як:

$$\begin{aligned} x &= x_a + V_x t \\ y &= y_a + V_y t \end{aligned} \quad (2)$$

Припустимо, як частковий випадок, що переріз поверхні є прямою лінією, рівняння якої може бути задано аналітичною залежністю:

$$y = a + bx . \quad (3)$$

Підставивши (2) в (3), за умови руху точки А отримаємо:

$$y_a + V_y t = a + b(x_a + V_x t) ,$$

або

$$y_a = a + b(x_a + V_x t) - V_y t .$$

В загальному випадку отримаємо рівняння прямої за її переміщення із швидкостями V_x та V_y :

$$y = a + b[x + (V_x - V_y) t] . \quad (4)$$

В початковий момент часу $t = 0$ та за умови $V_x = 0$ та $V_y = 0$ рівняння (4) перетвориться в (3), що підтверджує правильність його виведення.

Таким чином, поверхня, задана в перерізі прямою, може бути описана за допомогою рівняння (4), в якому враховано її форму та характер руху.

Припустимо, як частковий випадок, що переріз поверхні є параболою, рівняння якої може бути задано аналітичною залежністю:

$$y = x^2 . \quad (5)$$

Підставивши (2) в (5), за умови руху точки А отримаємо:

$$y_a + V_y t = (x_a + V_x t)^2 ,$$

або

$$y_a = x_a^2 + 2x_a V_x t + V_x^2 t^2 - V_y t .$$

В загальному випадку рівняння параболи за її переміщення із швидкостями V_x та V_y :

$$y = x^2 + (2xV_x - V_y) t + V_x^2 t^2 . \quad (6)$$

В початковий момент часу $t = 0$ та за умови $V_x = 0$ та $V_y = 0$ рівняння (6) перетворюється в (5), що підтверджує правильність його виведення.

Таким чином, поверхня, задана в перерізі параболою, може бути описана за допомогою рівняння (6), в якому враховано форму та характер руху поверхні.

Для визначення кутової швидкості коливання сопла ω розглянемо випадок обробки криволінійної поверхні за схемою, показаною на рис. 2. Для забезпечення рівномірної обробки сопло струменевого апарату має здійснювати коливний рух з кутовою швидкістю ω по дуговій траєкторії. Кутову швидкість ω подамо як похідну кута α по часу t : $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$.

В свою чергу, кут α залежить від форми криволінійної поверхні:

$$\text{tga} = \frac{df(x,t)}{dx} ,$$

звідки

$$\alpha = \arctg \frac{df(x,t)}{dx} . \quad (7)$$

Остаточно, кутова швидкість ω коливного руху сопла по дуговій траєкторії:

$$\omega = \frac{d(\arctg \frac{df(x,t)}{dx})}{dt} . \quad (8)$$

Отже, щоб дотриматися умов рівномірної обробки, а саме:

- 1) забезпечити постійну відстань від торця сопла до оброблюваної поверхні $L = const$;
 - 2) забезпечити постійний кут атаки струменя до оброблюваної поверхні $\beta = 90^\circ$, іншими словами, перпендикулярність осі сопла струменевого апарату твірній криволінійної поверхні;
- необхідно забезпечити такі режими обробки:

1) заготовка повинна здійснювати поступальний рух, описаний (2);
 2) лінійні швидкості руху виробу або сопла струменевого апарату повинні відповідати співвідношенню (1);

3) кутова швидкість руху сопла повинна відповідати (8).

На основі поданого вище теоретичного підходу може бути запропоновано алгоритм для визначення режимів струменевої обробки V_x , V_y , ω :

1. визначити рівняння кривої у як $f(x)$;
2. вибрати точку C з координатами $(0, y_c)$, в якій крива перетинається з віссю ОУ;
3. задати L , тобто відстань від точки C до торця сопла струменевого апарату;
4. задати швидкість руху поверхні V_x відносно осі ОХ як постійну величину;
5. визначити функцію для кривої в часі як $f(x, t)$;
6. визначити швидкість руху поверхні $V_y(x, t)$ відносно осі ОУ;
7. визначити кут нахилу дотичної до кривої α в точці C як $f(x, t)$;
8. визначити кутову швидкість руху сопла ω , як похідну від α в часі: $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$.

Даний алгоритм використано для отримання графічних залежностей з метою аналізу режимів струменевої обробки для різних форм поверхонь.

Результати досліджень та їх обговорення

Дослідимо один з найпростіших випадків, для якого переріз криволінійної поверхні є прямою лінією, загальне рівняння якої задано (3). Візьмемо значення коефіцієнта a та вільного члена b рівними 1, тоді (3) набуде вигляду:

$$y = x.$$

Координати точки C , в якій пряма перетнеться з віссю ОУ, візьмемо $(0, 0)$. Відстань L від точки C до торця сопла струменевого апарату задамо рівною 1, як і швидкість руху поверхні V_x відносно осі ОХ. Якщо швидкість рівна 1, тоді $x(t) = t$, а функцію для кривої в часі можемо записати таким чином:

$$y(t) = t.$$

Визначимо швидкість руху поверхні $V_y(x, t)$ відносно осі ОУ за (1):

$$V_y = V_x.$$

Тобто, за переміщення оброблюваної поверхні, заданої рівнянням перерізу $y = x$, відносно осі ОХ із сталою швидкістю, рівною 1, для забезпечення постійної відстані від торця сопла до оброблюваної поверхні, цю поверхню потрібно переміщувати відносно осі ОУ теж із швидкістю, рівною 1.

Очевидно, що тангенс кута нахилу поверхні буде рівним 1, а сам кут 45° . Для постійного кута нахилу поверхні відносно осі ОХ значення кутової швидкості за (8) становитиме 0, тобто сопло достатньо зорієнтувати нерухомо відносно оброблюваної поверхні, забезпечивши кут атаки 90° .

Дослідимо випадок, за якого переріз криволінійної поверхні є параболою, загальне рівняння якої задано (5). Рівняння параболи при її переміщенні зі швидкостями V_x та V_y описується виразом (6).

Аналогічно до попереднього випадку координати точки C , в якій пряма перетнеться з віссю ОУ, візьмемо $(0, 0)$. Відстань L від точки C до торця сопла струменевого апарату задамо рівною 1, як і швидкість руху поверхні V_x відносно осі ОХ. Якщо швидкість рівна 1, тоді $x = t$, а функцію для кривої в часі можемо записати таким чином:

$$y(t) = t^2.$$

Визначимо швидкість руху поверхні $V_y(x, t)$ відносно осі ОУ за (1):

$$V_y(t) = 2t.$$

Графіки лінійних швидкостей руху для криволінійної поверхні, переріз якої задано параболою, подано на рис. 3.

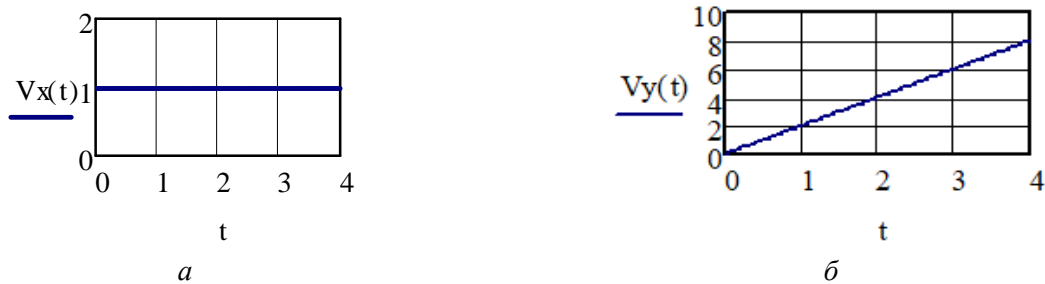


Рис. 3. Лінійні швидкості руху оброблюваної поверхні:
а) горизонтальні вздовж осі OX ; б) вертикальні вздовж осі OY
Fig. 3. Linear velocities of the treated surface:
a) horizontal along the axis OX ; b) vertical along the axis OY

Кут нахилу дотичної до кривої a в точці C визначаємо за (7):

$$a(t) = \arctg(2t),$$

а кутову швидкість ω коливного руху сопла по дуговій траєкторії за (8):

$$w(t) = \frac{2}{4t^2 + 1}.$$

Графіки зміни кута нахилу криволінійної поверхні та кутової швидкості коливного руху сопла струменевого апарата показані на рис. 4. Під час переміщення поверхні кут нахилу зростає, а кутова швидкість спадає.

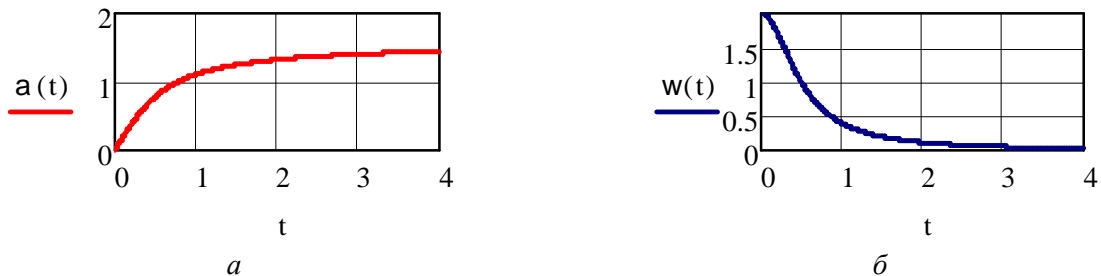


Рис. 4. Режими струменевої обробки, пов'язані з коливним рухом сопла:
а) кут нахилу дотичної до поверхні; б) кутова швидкість сопла
Fig. 4. Jet processing modes associated with the oscillating movement of the nozzle:
a) angle of surface inclination; b) nozzle angular velocity

Висновки

У статті розроблено математичний підхід, який дозволить забезпечити рівномірну обробку криволінійних поверхонь виробів за допомогою визначення режимів обробки, а саме лінійних та кутових швидкостей переміщення виробу і/або струменевого апарату.

Під час формалізації процесу струменевої обробки розглянуто випадки, для яких рівномірність обробки криволінійної поверхні досягається дотримання постійної відстані від торця сопла до поверхні або дотриманням постійного кута атаки струменя до оброблюваної поверхні. Для цих випадків з використанням графічного представлення струменевої обробки отримано математичні залежності для визначення лінійних швидкостей переміщення виробу та кутової швидкості руху сопла. На основі розробленого математичного підходу запропоновано алгоритм для визначення режимів струменевої обробки та отримано графіки зміни лінійної та кутової

швидкостей в часі для різних форм поверхонь.

За переміщення плоскої оброблюваної поверхні, заданої рівнянням перерізу $y = x$, по горизонталі із певною сталою швидкістю для забезпечення постійної відстані від торця сопла до оброблюваної поверхні, цю поверхню потрібно переміщувати по вертикалі із такою ж швидкістю, як по горизонталі. Для постійного кута нахилу цієї поверхні відносно горизонталі сопло достатньо зорієнтувати нерухомо відносно оброблюваної поверхні, забезпечивши кут атаки 90° .

Для рівномірної обробки криволінійної оброблюваної поверхні, переріз якої заданий параболою $y = x^2$, швидкість переміщення поверхні по вертикалі математично описується лінійно зростаючою функцією, а кутова швидкість коливного руху сопла спадає, що пов'язано із зростанням кута нахилу дотичної до поверхні.

У подальших дослідженнях планується визначення показників якості криволінійних поверхонь виробів, отриманих в результаті струменевої обробки.

Список літератури

- [1] X. Li and C. Jiang, "Numerical Simulation Analysis of Shot Peening Residual Stress on Aluminum Alloy Surface Based on Finite Element Method," 2019 6th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA), pp. 183-190, 2020, doi: 10.1109/DSA.2019.00030.
- [2] W. S. Slat, V. Malau and P. T. Iswanto, "The Effects of Shot Peening Treatment on the Hardness and Fatigue Strength of HQ 805," 2018 International Conference on Applied Science and Technology (iCAST), 2018, pp. 142-145, doi: 10.1109/iCAST1.2018.8751516.
- [3] Ruihong Wang, Jie Xu and Guangyi Li, "Intelligent prediction of jet shot peening surface roughness," 2015 4th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 2015, pp. 786-789, doi: 10.1109/ICCSNT.2015.7490859.
- [4] J. Liu and R. Liao, "Simulation of Shot Peening Process Using Combined Hardening Model," 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEEE.2010.5660980.
- [5] Саленко О.Ф., Струтинський В.Б., Загірняк М.В., "Ефективне гідрорізання," Кременчук: КДПУ, С. 488, 2005.
- [6] Salenko A.F., Shchetinin V.T., Gabuzyan G.V., et al., "Cutting of Polycrystalline Superhard Materials by Jet Methods," Journal of Superhard Materials, vol. 38, no 5, pp. 351-362, 2016, doi:10.3103/S1063457616050063.
- [7] Stotsko Z.A., Stefanovych T.O., "Investigations on the Machine Parts Treatment by Non-bound Blast Particles, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering," vol. 49, no 2, pp. 440-459, 2011, url: http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol49_2/49236.pdf.
- [8] Stotsko Z.A., Stefanovych T.O., "Surface Layer Modelling and Diagnostic after Loose Solid Balls Treatment", Przetwórstwo Tworzyw, vol. 17, no 6 (144), pp. 529-533, 2011, url: <https://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPC5-0007-0024>.
- [9] Stotsko Z.A., Stefanovych T.O., "Modelling of Abrasive Blasting Technological Modes for Curvilinear Surfaces of Machine Parts," Przetwórstwo Tworzyw, vol. 19, no 1 (151), pp. 54-57, 2013, url: <https://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-55b7f683-c04d-4c6f-9341-dbe3f9902069>.

Z. Stotsko, T. Stefanovych
Lviv Polytechnic National University

DETERMINATION OF JET TREATMENT MODES FOR CURVILINEARE SURFACES OF PRODUCTS

Aim. Developing an approach for determining the modes of jet treatment for the curved surfaces of products to ensure uniform processing, which is achieved by maintaining a constant distance from the nozzle end to the surface and maintaining the perpendicularity of the nozzle axis to the curved surface at the point of processing during movement and changing the nozzle inclination. **Method.** The basic principles of analytical geometry on the plane are used to describe the processed curved surface. Kinematic equations of a material point motion as the basic principles of theoretical mechanics were used to research the motion of the processed curved surface. Graphical dependences and analysis of the obtained results were carried out by using the mathematical editor. **Results.** The result is the

complex of the mathematical models, the use of which in control systems of technological equipment will ensure uniform processing by adjusting the linear velocity of the product surface and the angular velocity of the jet nozzle, and thus ensure the required accuracy and quality of products. **Scientific novelty.** The approach for modeling jet treatment of products with curved surfaces is improved, namely the method of determining processing modes under conditions of constant distance from the nozzle end to the surface and perpendicularity of the nozzle axis to the tangent at the processing point is proposed. Analytically, expressions for mathematical description of curved surfaces depending on their shape and character of motion are obtained. **Practical significance.** The proposed approach is recommended to be used in technological processes of jet treating for the products of complex configuration, when designing units of technological equipment or devices designed to ensure the movement of the product or the tool. Mathematical models can be the basis for ensuring the quality of curved surfaces of products obtained by jet treating.

Key words: jet treatment, process equipment, processing modes, curved surface, product movement.

References

- [1] X. Li and C. Jiang, "Numerical Simulation Analysis of Shot Peening Residual Stress on Aluminum Alloy Surface Based on Finite Element Method," 2019 6th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA), pp. 183-190, 2020, doi: 10.1109/DSA.2019.00030.
- [2] W. S. Slat, V. Malau and P. T. Iswanto, "The Effects of Shot Peening Treatment on the Hardness and Fatigue Strength of HQ 805," 2018 International Conference on Applied Science and Technology (iCAST), 2018, pp. 142-145, doi: 10.1109/iCAST1.2018.8751516.
- [3] Ruihong Wang, Jie Xu and Guangyi Li, "Intelligent prediction of jet shot peening surface roughness," 2015 4th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 2015, pp. 786-789, doi: 10.1109/ICCSNT.2015.7490859.
- [4] J. Liu and R. Liao, "Simulation of Shot Peening Process Using Combined Hardening Model," 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEEE.2010.5660980.
- [5] Salenko A.F., Strutynskyi V.B., Zagirnyak M.V., "Efektyvne Gidrorizannya (Effective Jet Cutting)," Kremenchuk: KDPU, P. 488, 2005.
- [6] Salenko A.F., Shchetinin V.T., Gabuzyan G.V., et al., "Cutting of Polycrystalline Superhard Materials by Jet Methods," Journal of Superhard Materials, vol. 38, no 5, pp. 351-362, 2016, doi:10.3103/S1063457616050063.
- [7] Stotsko Z.A., Stefanovych T.O., "Investigations on the Machine Parts Treatment by Non-bound Blast Particles, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering," vol. 49, no 2, pp. 440-459, 2011, , url: http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol49_2/49236.pdf.
- [8] Stotsko Z.A., Stefanovych T.O., "Surface Layer Modelling and Diagnostic after Loose Solid Balls Treatment", Przetwórstwo Tworzyw", vol. 17, no 6 (144), pp. 529-533, 2011, url: <https://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPC5-0007-0024>.
- [9] Stotsko Z.A., Stefanovych T.O., "Modelling of Abrasive Blasting Technological Modes for Curvilinear Surfaces of Machine Parts," Przetwórstwo Tworzyw, vol. 19, no 1 (151), pp. 54-57, 2013, url: <https://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-55b7f683-c04d-4c6f-9341-dbe3f9902069>.