

Анализ формул (15), (16) и (18) показывает, что при ЭИП выпуклых криволинейных поверхностей толщина ПГО в области кривизны меньше по сравнению с плоским участком анода ($l_1 < l$), что приводит к возрастанию в области кривизны напряженности электрического поля и интенсивности съема металла. Этим можно объяснить высокую эффективность при ЭИП удаления заусенцев, притупления острых кромок и невозможность заточки изделий типа игл. Полирование вогнутых криволинейных поверхностей сопровождается увеличением толщины ПГО ($l_1 > l$) и снижением производительности обработки вогнутого участка поверхности.

Выводы

1. Разработанная физико-математическая модель анодного процесса описывает поведение электролита в ПГО для четырех режимов анодной обработки: коммутационного, нагрева электролитной плазмой, электрогидродинамического и электролитно-разрядного.

2. Частота импульсных электрических разрядов может быть использована в качестве функции контроля и управления источником технологического тока установки ЭИП.

Список литературы: 1. Мрочек Ж.А., Пархутик А.П., Синькевич Ю.В. Анодные эффекты в электролитах // POROUS SEMICONDUCTORS – SCIENCE AND TECHNOLOGY. – Tenerife, Spain, 10 – 15 march, 2002. – р. 106 – 108. 2. Лазаренко Б.Р., Фурсов С.П., Факторович А.А., Галанина Е.К., Дураджи В.Н. Коммутация тока на границе металл – электролит. – Кишинев: Ред. – изд. отд АН МССР, 1971. – 74 с. 3. Мурас В.С. Некоторые элементы процесса электролитического нагрева // Сб. трудов ФТИ АН БССР. – Мн., 1956. – Вып. 3. – С. 53 – 58. 4. Лазаренко Б.Р., Дураджи В.Н., Факторович А.А., Брянцев И.В. Об особенностях электролитного нагрева при анодном процессе // Электронная обработка материалов. – 1974. – №3. – С. 37 – 40. 5. Фиргер И.В. Термическая обработка сплавов. – Л.: Машиностроение, 1982. – 304 с. 6. Лазаренко Б.Р., Дураджи В.Н., Факторович А.А., Брянцев И.В. Исследование пробоя между металлическим и электролитным электродами // Электронная обработка материалов. – 1970. – № 4. – С. 18 – 21. 7. Королева С.Н., Остроумов Г.А. Роль инертности жидкости в развитии электрического пробоя // Электронная обработка материалов. – 1966. – №3. – С. 20 – 27.

Сдано в редакцию 4.05.06

Рекомендовано д.т.н., проф. Тока А.

ПОБУДОВА І ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ШВИДКОСТЕЙ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ СТРУМИННІЙ ОБРОБЦІ ПОВЕРХОНЬ ВИРОБІВ

Стоцько З.А., Стефанович Т.О. (НУ"ЛПІ", м. Львів, Україна)

Correlation between velocity of the working medium and the characteristics of equipment for jetting process is given and analysed. Distribution of the characteristics along the cross-sections of jet is taken into consideration. The theoretical diagram of velocity distribution in the perpendicular to the jet axis cross-section formed by Math CAD are given. Proposed algorithm is a part of the general mathematical model of jetting process.

Вступ.

Методи струминної обробки поверхонь виробів відносяться до прогресивних технологій і можуть використовуватися у виробництві для вирішення різнопланових задач. До таких задач, зокрема, відносяться:

- очищення поверхонь від бруду, окалини, ґрату;
- декоративна обробка поверхонь;
- підвищення втомлюваної міцності деталей машин;
- механічна обробка поверхонь виробів складного профілю зі зніманням невеликих припусків;
- різання листового матеріалу струменем абразиву із отриманням виробів з криволінійними і складними контурами.

Широкий спектр застосування методів струминної обробки, а також екологічні проблеми, які виникають при їх використанні у виробництві, породжують потребу у розробці і впровадженні спеціального технологічного обладнання на базі CAD-CAM систем.

В основі будь-якої CAD-CAM системи лежать експериментально підтверджені математичні залежності, які із достатньою мірою достовірності описують процес. Для цілої гами процесів струминної обробки поверхонь виробів (рис. 1) такі залежності можуть бути отримані шляхом математичного моделювання цих процесів.

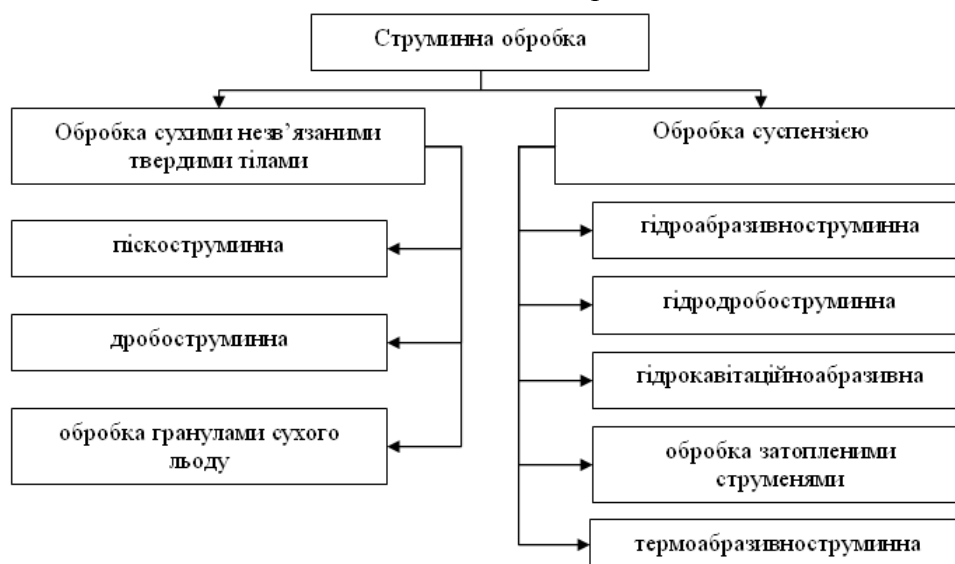


Рис. 1 Класифікація методів струминної обробки

Аналіз літературних джерел вказує на те, що як на теренах України, так і за її межами, проводиться велика кількість експериментальних досліджень у галузі струминної обробки, спрямованих на вирішення конкретних прикладних задач. У [1] на основі отриманих експериментальних даних авторами було відзначено, що гідроабразивна обробка поверхні покращує адгезійні властивості між матеріалом основи і покриттям. У [2] встановлено вплив технологічних параметрів процесу на залишкові напруження стиску і шорсткість оброблених поверхонь при термоабразивному і піскоструминному методах обробки. У [3, 4] експериментально доведено, що втомлювана міцність різних матеріалів підвищується після дробоструминної обробки.

Основні підходи до теоретичного описання і дослідження процесів струминного оброблення були закладені А.Є. Проволоцьким. Ним було запропоновано залежність, яка дозволяє наближено оцінити залежність величини лінійного зняття матеріалу від параметрів обробки; досліджено оброблюваність екранованих та неекранових поверхонь із різних матеріалів; проведено імітаційне моделювання контактної взаємодії одиничного тіла із оброблюваною поверхнею для дослідження зміни лінійних розмірів поверхні та шорсткості під час струминної обробки [5]. У монографії [6] авторами проведено глибинний і ємнісний аналіз процесів струминно-абразивного оброблення, і запропоновано новий комплексний підхід у теорії гідрорізання, який полягає у тому, що керування положенням елементів

борозенки розрізу дозволяє домогтися зниження енергетичних витрат на реалізацію процесу та суттєво підвищити якість обробки. Групою закордонних науковців під керівництвом Meguid S.A. вже тривалий час ведуться теоретичні дослідження процесу дробоструминної обробки, зокрема методом кінцевих елементів [7-8].

На основі проведеного аналізу наукових напрацювань і здобутків у галузі струминної обробки було встановлено ряд задач і проблем, для розв'язання яких необхідне детальніше вивчення наявних і створення нових підходів:

- при вивченні процесів струминного оброблення досліджуються параметри, отримані, як правило, за допомогою тільки одного з механізмів, які приймають участь у формуванні геометричних і фізичних характеристик оброблюваної поверхні. Комплексний підхід і побудова гнучких математичних моделей з можливістю легкої адаптації їх до конкретних виробничих умов дозволить врахувати параметри, отримані на поверхні завдяки дії різних механізмів, а саме мікрорізання, гідромолекулярного ефекту, крихкого руйнування та мікропластичного деформування, і дасть змогу набагато повніше описати динаміку формоутворення поверхонь при струминному обробленні;
- у відомих математичних моделях не враховується розподіл характеристик робочого середовища у поперечних перерізах струменя розпилення. Для струменів із дозвуковими швидкостями руху робочого середовища у них при розрахунку режимів оброблення врахування цього розподілу дозволить суттєво підвищити точність розрахунків. Важливим є врахування цього розподілу і при використанні струминної обробки для очищення поверхонь;
- відсутні математичні моделі, які описують процес струминного оброблення для криволінійних поверхонь виробів.

Метою даної статті є теоретично отримати і проаналізувати графічні залежності розподілу швидкостей робочого середовища в поперечних перерізах струменя розпилення, що є одним з етапів побудови універсальної математичної моделі процесу струминної обробки на основі запропонованої раніше енергетичної концепції [9].

Основний зміст і результати роботи.

Схема струменя, що витікає з сопла круглого перерізу, представлена на рис. 2

Струмінь умовно розділений на дві ділянки: початкову, в якій швидкість ядра струменя залишається рівною початковій швидкості, і основну, в якій осьова швидкість зменшується в міру віддалення від сопла. Як видно із схеми, представленої на рис. 2, швидкість вздовж поперечних перерізів струменя, крім перерізу, який співпадає із торцем сопла струминного апарату, змінюється. Для опису зміни швидкості вздовж поперечного перерізу струменя скористаємося наступною залежністю [10]:

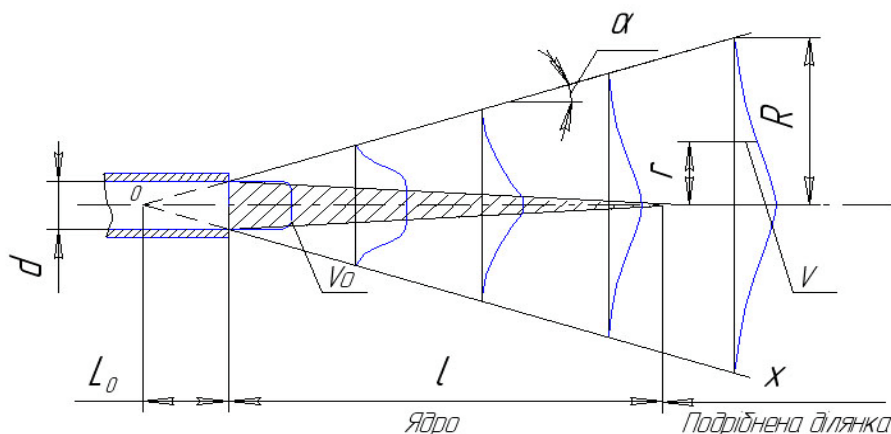


Рис. 2 Схема струменя, що витікає з сопла круглого перерізу

$$V = V_L \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{1.5} \right)^2 \quad (1)$$

де V_L – швидкість на осі струменя на відстані L від торця сопла струминного апарату; r – відстань від осі струменя до розглядуваної точки поперечного перерізу; R – граничний радіус струменя, тобто відстань від осі струменя до точок з нульовою швидкістю.

Епюра швидкостей, яка задається формулою (1), представлена на рис. 3.

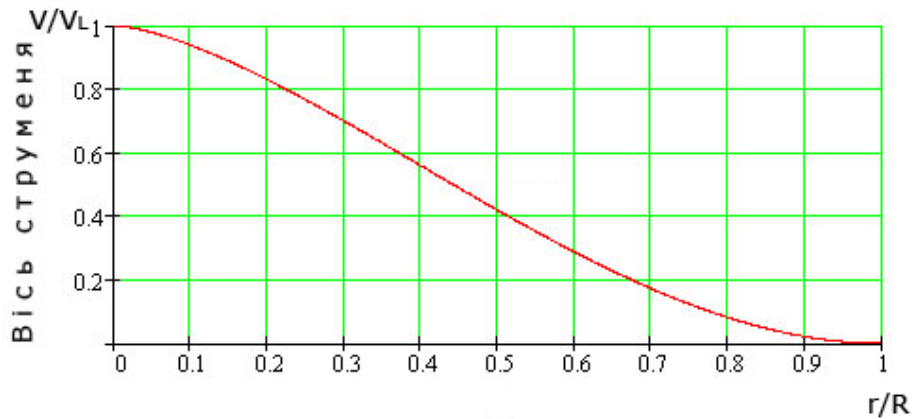


Рис. 3 Епюра швидкостей, отримана за формулою (1)

Формула (1) адекватно описує розподіл швидкостей у поперечних перерізах для основної ділянки струменя, на якій епюри швидкостей є подібними. Для опису розподілу швидкостей у поперечних перерізах для початкової ділянки струменя внесемо корективи у формулу (1). Для цього запишемо її у загальному вигляді, замінивши емпіричні коефіцієнти змінними k_1 і k_2 :

$$V = V_L \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{k_1} \right)^{k_2} \quad (2)$$

Проаналізуємо, яким чином впливає зміна коефіцієнтів k_1 і k_2 на форму епюри швидкостей. Для цього засобами MathCad побудуємо графічні залежності для різних значень k_1 і k_2 (рис. 4).

При збільшенні коефіцієнта k_1 епюра швидкостей стає опуклішою, з'являється і видовжується площадка зі сталим значенням швидкостей у центральній частині епюри. При збільшенні коефіцієнта k_2 епюра швидкостей стає більш ввігнутою, з'являється і видовжується площадка у периферійній частині епюри. Таким чином, зміна значень коефіцієнтів k_1 і k_2 веде до зміни форми епюри швидкостей, дозволяючи робити її більш ввігнутою чи випуклою, утворювати площадки зі сталим значенням швидкостей у центральній частині епюри або на її периферії. А тому дозволяє адекватніше описати розподіл швидкостей у поперечних перерізах струменя для його початкової ділянки підбором відповідних значень коефіцієнтів k_1 і k_2 .

Зведення формули (1) до загального вигляду (2) дає змогу використовувати її для опису розподілу швидкостей у різних ділянках струменя і забезпечує гнучкість при адаптації загальної математичної моделі струминної обробки до реальних виробничих умов.

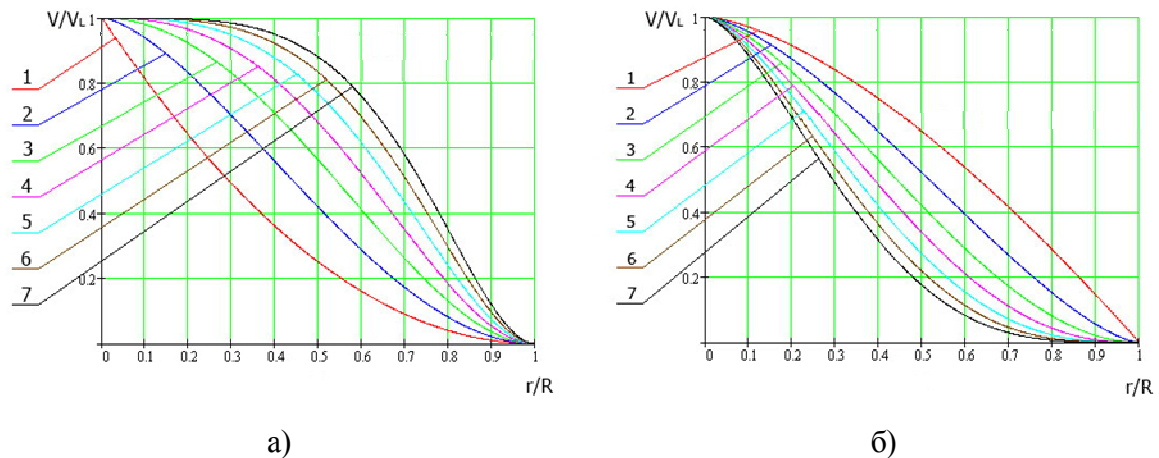


Рис. 4 Епюра швидкостей:

- а) для різних значень k_1 при $k_2 = 2$; б) для різних значень k_2 при $k_1 = 1,5$;
 1 - $k_1 = 1$; 2 - $k_1 = 1,5$; 3 - $k_1 = 2$; 4 - $k_1 = 2,5$; 1 - $k_2 = 1$; 2 - $k_2 = 1,5$; 3 - $k_2 = 2$; 4 - $k_2 = 2,5$;
 5 - $k_1 = 3$; 6 - $k_1 = 3,5$; 7 - $k_1 = 4$; 5 - $k_2 = 3$; 6 - $k_2 = 3,5$; 7 - $k_2 = 4$;

Для визначення швидкості на осі струменя на відстані L від торця сопла струминного апарату введемо наступну емпіричну формулу [10]:

$$V_L = V_0 \frac{0,96}{\frac{2aL}{d_c} + 0,29}, \quad (3)$$

де V_0 – швидкість струменя на виході з сопла; L – відстань від сопла до оброблюваної поверхні; d_c – діаметр сопла круглого перерізу; a – експериментальний коефіцієнт турбулентності струменя. Для розрахунків рекомендується приймати $a = 0,07 \dots 0,14$.

Підставивши значення з формули (3) у формулу (2), отримаємо загальну формулу для визначення розподілу швидкостей у струмені розпилення:

$$V = V_0 \frac{0,96}{\frac{2aL}{d_c} + 0,29} \cdot \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{k_1} \right)^{k_2}. \quad (4)$$

Для отримання розподілу швидкостей в струмені розпилення у вигляді, аналогічному до розподілу маси [11], складено алгоритм для обчислення розподілу швидкостей V_{ij} у струмені розпилення, які має елементарна маса незв'язаних твердих тіл на кожній з ділянок досліджуваної області xOy , обмежених абсцисами x_i і x_{i+1} та ординатами y_j та y_{j+1} . Досліджувана область xOy співпадає з оброблюваною поверхнею і є нормальною до осі струменя Oz . Для кожної з ділянок досліджуваної області значення швидкостей усереднимо, прийнявши за базове значення, значення швидкості в точці перетину діагоналей досліджуваної прямокутної ділянки D , обмеженої абсцисами x_i і x_{i+1} та ординатами y_j та y_{j+1} . Виходячи з цих міркувань та на основі теореми Піфагора відстань від осі струменя до розглядуваної точки поперечного перерізу r запишемо через координати x_i і x_{i+1} , y_j і y_{j+1} цієї точки (рис. 5):

$$r = \sqrt{\left(\frac{x_i + x_{i+1}}{2} \right)^2 + \left(\frac{y_j + y_{j+1}}{2} \right)^2}. \quad (5)$$

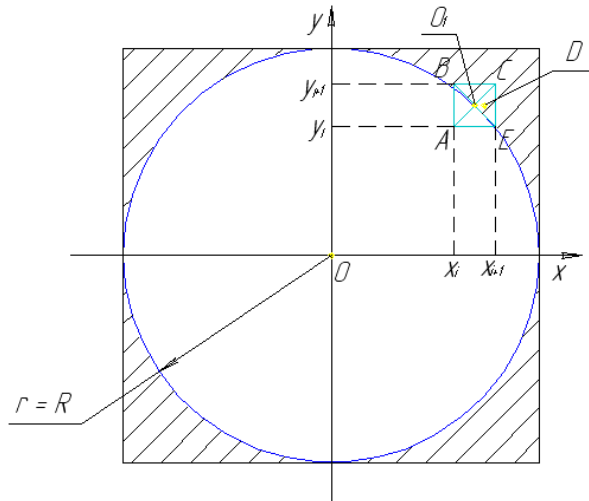


Рис. 5 До алгоритму обчислення швидкості V_{ij}

Підставивши значення r з формули (5) у формулу (4), отримаємо:

$$V_{ij} = V_0 \frac{0,96}{\frac{2aL}{d_c} + 0,29} \cdot \left(1 - \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{x_i + x_{i+1}}{2} \right)^2 + \left(\frac{y_j + y_{j+1}}{2} \right)^2}}{R} \right)^{k_1} \right)^{k_2}. \quad (6)$$

Формула (6) є базовою при побудові алгоритму для обчислення розподілу швидкостей пакетів незв'язаних твердих тіл у довільній точці поперечного перерізу струменя розпилення і дослідження процесу обробки криволінійних поверхонь, а також плоских поверхонь при обробці з певним кутом атаки. Хід міркувань при побудові алгоритму для обчислення розподілу швидкостей є аналогічним до міркувань при побудові алгоритму для обчислення розподілу маси [12]. Блок-схема алгоритму наведена на рис. 6. Результати обчислення виводяться у вигляді матриці:

$$V = \begin{pmatrix} V_{11} & \dots & \dots & V\left(\frac{2 \cdot n_y}{k_y}\right) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & V_{ij} & \dots \\ V\left(\frac{2 \cdot n_x}{k_x}\right) & \dots & \dots & V\left(\frac{2 \cdot n_x}{k_x}\right)\left(\frac{2 \cdot n_y}{k_y}\right) \end{pmatrix}.$$

За даними матриці можна побудувати графік розподілу швидкості пакетів незв'язаних твердих тіл в поперечному перерізі струменя розпилення. Для виконання обчислень з використанням запропонованого алгоритму авторами в прикладній системі автоматизованих розрахунків MathCAD розроблена програма. Результати розрахунку для одного з поперечних перерізів струменя подані на рис. 7 у вигляді тривимірної гістограми.

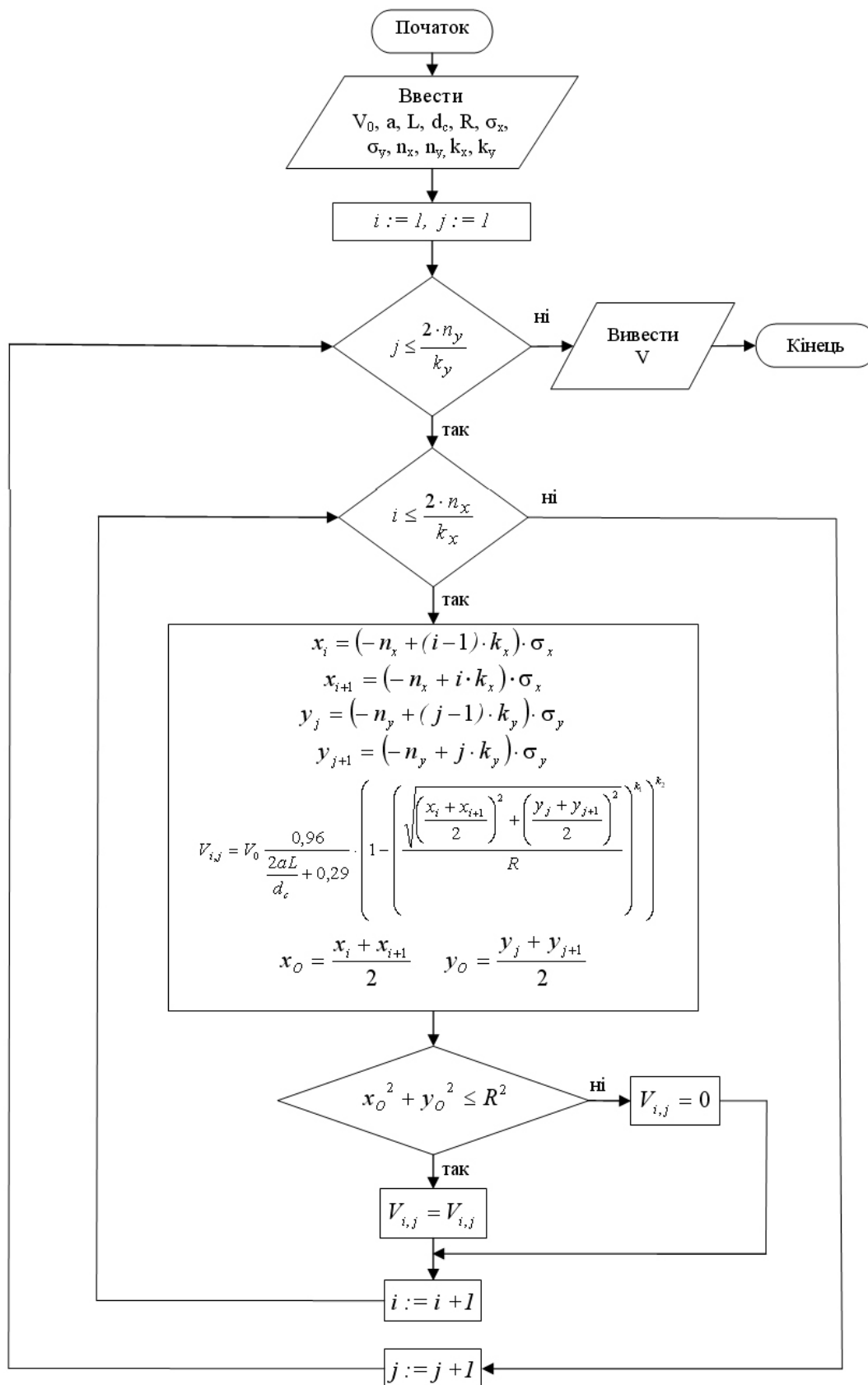


Рис. 6 Блок-схема алгоритму обчислення швидкості незв'язаних твердих тіл в поперечних перерізах струменя розпилення V_{ij}

Проаналізувавши розподіли швидкостей для різних значень, обчислені за формулою (6), ми встановили, що із збільшенням діаметра сопла і тиску в повітря в підвідному трубопроводі струминного апарата, осьова швидкість в міру віддалення від сопла зростає, що, в свою чергу, веде до інтенсифікації обробки. Із збільшенням коефіцієнта турбулентності і густини робочого середовища осьова швидкість в міру віддалення від сопла спадає, що веде до зменшення інтенсивності обробки.

Висновки.

1. Проаналізована залежність, яка описує розподіл швидкостей в поперечних перерізах струменя розпилення у площині оброблення, нормальній до осі струменя, для сопла круглого перерізу.

2. Запропоновано простий спосіб модифікації форми епюри швидкостей, що дозволяє адекватніше описати розподіл швидкостей у поперечних перерізах струменя для його початкової ділянки і забезпечує легку адаптацію математичної моделі до реальних умов.

3. Реалізована в MathCAD програма дає можливість проаналізувати вплив параметрів обладнання, струменя і робочого середовища на розподіл швидкостей у струмені розпилення. За допомогою цієї програми для конкретних вхідних параметрів процесу побудовано графічні залежності розподілу швидкості в струмені розпилення.

4. Врахування розподілу характеристик робочого середовища (маси і швидкості) у поперечних перерізах струменя розпилення при математичному моделюванні процесу дає змогу забезпечити рівномірність обробки і покращити якісні показники поверхонь виробів.

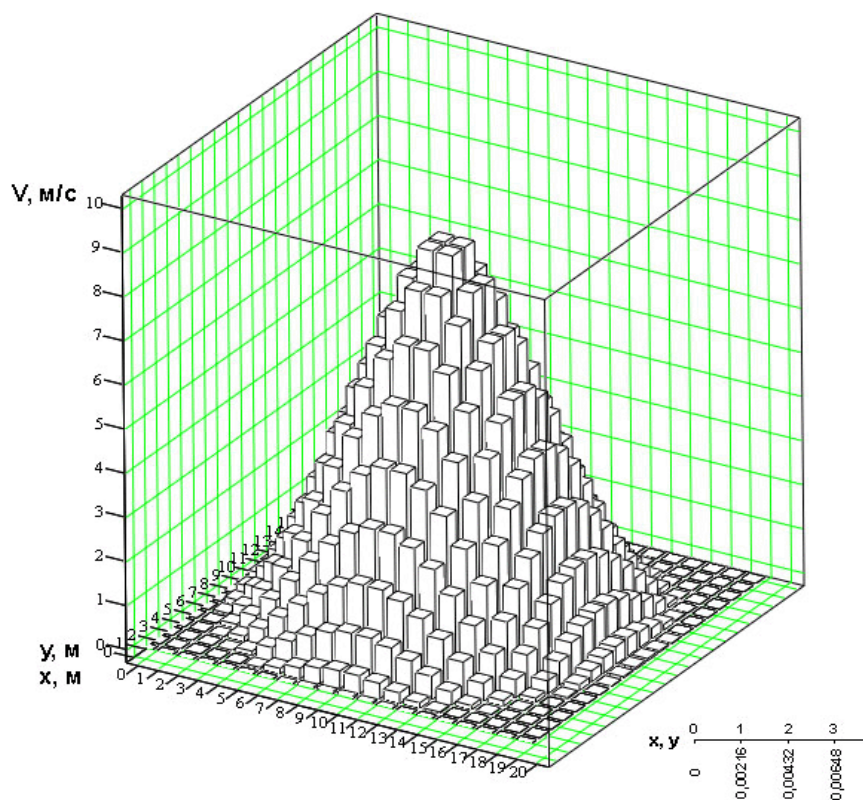


Рис. 7 Розподіл швидкостей в поперечному перерізі струменя розпилення для наступних параметрів обробки: $d_c = 0,01$ м; $L = 0,1$ м; $\Delta p = 0,5 \cdot 10^5$ Па; $\alpha = \pi/18$; $\rho_c = 1280$ кг/м³; $a = 0,14$; $k_1 = 1,5$; $k_2 = 2$; $\xi = 1$

5. Залежність для отримання розподілу швидкостей робочого середовища у поперечних перерізах струменя розпилення і запропонований на її основі алгоритм розрахунків дозволять обчислити і дослідити розподіл кінетичної енергії у довільній точці поперечного перерізу струменя розпилення при обробленні криволінійних поверхонь, а також плоских поверхонь при обробленні з певним кутом атаки.

Список літератури: 1. Wang L. Erosion Testing and Surface Preparation Using Abrasive Water-Jetting // ASM International, Journal of Materials Engineering and Performance. – 2004. – Vol.13, No.1. – P. 103-106. 2. Зінь І., Студент М., Затхей Б. Зміцнювальна підготовка поверхні резервуарів перед нанесенням захисних покриттів // Вісник Львівського державного аграрного університету: Агроінженерні дослідження. - 2005. - №9. - С. 288-298. 3. Luo J.; Bowen P. Effects of Temperature and Shot Peening on S–N Behavior of a PM Ni-Base Superalloy UDIMET 720 // Minerals, Metals & Materials Society and ASM Intl, Metallurgical and Materials Transactions A – 2004. - Vol.35, Suppl.1. – P. 1007-1016. 4. Shiozawa K., Lu L. Very high-cycle fatigue behaviour of shot-peened high-carbon-chromium bearing steel // Blackwell Publishing, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. - 2002. - Vol.25, No.8-9. - P. 813-822. 5. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. – К.: Техника, 1989. – 177 с. 6. Саленко О.Ф., Струтинський В.Б., Загірняк М.В. Ефективне гідрорізнання. Монографія. – Кременчук: КДПУ, 2005. – 488 с. 7. Impact Surface Treatment, edited by S.A. Meguid. – London and New York, 1986 – 326 p. 8. Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C., Daly J. Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses - Theory, Methods and Applications // Elsevier Science, Finite Elements in Analysis and Design. – 1999. – Vol.31, No.3. - P. 179-191. 9. Стоцько З.А., Стефанович Т.О. Енергетична концепція процесу струменевої обробки поверхонь незв'язаними твердими тілами // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2005. – №39. – С. 99-104. 10. Марець В.М. Разработка средств и методов повышения стабильности параметров покрытий элементов электронных приборов при струйном нанесении // диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук. – Львов: ЛПИ, 1988. 11. Стоцько З.А., Стефанович Т.О. Моделювання процесу струминної обробки поверхонь незв'язаними твердими тілами // Машинознавство. – 2005. – №6. – С. 31-34. 12. Стоцько З.А., Стефанович Т.О. Математична модель розподілу маси речовини в струмені розпилення при струменевої обробці поверхонь незв'язаними твердими тілами // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2005. – №535. – С. 39-44.

Сдано в редакцию 21.03.06

Рекомендовано д.т.н., проф. Тока А.

РЕШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ

Стрельников В. Н. (ЗАО «НКМЗ», г. Краматорск, Украина)

Features of the decision of a contact problem of thin-walled designs, including multilayered environments, with reference to transfers by gearing with intermediate bodies качения are considered.