

УДК 621.91.005

І.В. ПЕТКО, Т.Я. БІЛА, В.М. ПАВЛЕНКО

Київський національний університет технологій та дизайну

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ШВИДКОПЛИННИМ СТРУМЕНЕМ РІДИНИ

Стаття присвячена дослідженню процесу розрізання матеріалів високошвидкісним струменем рідини. Проведено теоретичні дослідження продуктивності процесу гідрорізання, та розрахунок тривалості оброблення різних матеріалів залежно від величини енергії, що подається на одиницю поверхні матеріалу. Визначено швидкість подачі для композиційних та металевих матеріалів залежно від величини тиску робочої рідини та діаметра сопла.

Ключові слова: гідроструменеве оброблення, швидкоплинний струмінь, інтенсифікація, мікрорельєф, напружений стан, сопло, плин рідини, розрізування поверхонь.

I.V. PETKO, T.Y. BILA, V.M. PAVLENKO

Kyiv National University of Technology and Design

THEORETICAL STUDIES OF THE PROCESS OF MATERIAL FRACTURE WITH A RAPID STREAM OF LIQUID

The article investigates the process of cutting the material with high-speed jet of liquid. There have been conducted theoretical research of process performance of water jet, as well as the calculation of the duration of various material processing, depending on the amount of energy supplied per unit of material surface. The feed rate for composite and metallic materials has been determined, considering the magnitude of the working fluid pressure and the perimeter of the nozzle.

Key words: water-jet processing, a passing jet, intensification, micro-relief, stress state, the nozzle, and the fluid flow, the cutting surfaces.

Вступ

В сучасних умовах підготовки виробництва основна маса неметалевих матеріалів розрізаються та розкрояються, в основному, механічними ножами. Хоча цим інструментам притаманні великі переваги, але є і немало недоліків, серед яких, в першу чергу, необхідність постійного перезаточування зношеної робочої кромки і, як наслідок, практична неможливість автоматизації процесу на кожній технологічній операції. Розрізання матеріалу високошвидкісним струменем рідини виключає перелічені недоліки, а тому у різних галузях промисловості пристрої для розрізання водяним струменем все частіше застосовуються для оброблення таких матеріалів, як гума, шкіра, пластмаси, картон, азбест тощо.

Постановка завдання

Не дивлячись на ряд експериментальних і теоретичних робіт [1–3], до теперішнього часу не розроблена досить обґрунтована теорія проникнення безперервних швидкоплинних струменів в різні матеріали, що пов'язано з багатогранністю і складністю технологічного процесу, який може включати стискання, розтягування, ерозію, зсув, розтріскування, кавітаційне зношення. Таким чином, будь-яка розроблена математична модель матиме межі застосування.

Метою дослідження є побудова аналітичної моделі різання матеріалів струменем рідини і визначення залежності швидкості горизонтальної подачі матеріалу, що розрізається, від параметрів безперервного швидкоплинного струменя, фізико-механічних властивостей та товщини матеріалу.

Результати дослідження

Для спрощення фізичної моделі процес руйнування матеріалу умовно поділений нами на дві стадії. Для першої стадії, пов'язаної з деформацією поверхні і ущільненням матеріалу, отримані аналітичні вирази для визначення часу t_1 і швидкості v_1 проникнення струменя в матеріал [4].

Друга стадія процесу характеризується утворенням тріщин в зоні пластичної деформації і подальшим розділенням матеріалу за рахунок їх розвитку і злиття. При цьому оброблювана поверхня знаходиться під дією пластичних деформацій, деформацій зсуву і сколювання.

Для побудови математичної моделі руйнування матеріалу на другій стадії введемо наступні припущення:

- ріжучий струмінь рідини складається з початкової і основної областей (рис. 1);
- динамічний тиск струменя в межах початкової області дорівнює динамічному тиску струменя на виході з сопла [5];
- руйнування відбувається, за умови, що середній динамічний тиск в поперечному перетині струменя перевищує твердість матеріалу;
- для величини динамічного тиску струменя p_c основної області справедлива рівність

$$p_c = (p_1 - \Delta p_1) \frac{L_n}{L}, \quad (1)$$

де p_1 – динамічний тиск струменя на виході з сопла; Δp_1 – втрати тиску на першій стадії руйнування;

L_n – довжина початкової ділянки струменя; L – відстань від сопла до контактної площини.

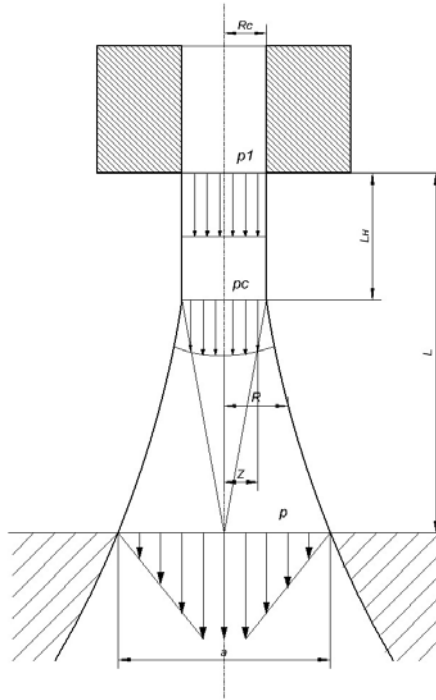


Рис. 1. Схема розширення струменя в повітрі

Якщо припустити, що на першій стадії різання енергія струменя витрачається лише на деформацію матеріалу, то для умов ідеальної пружності запишемо

$$\Delta p_1 = \frac{pv_0^2}{2} - \frac{pv_1^2}{2} = \frac{pv_0^2}{2} (1 - 0.7^2) \approx \frac{1}{2} p_1 \quad (2)$$

Для радіусу струменя R і радіального розподілення динамічного тиску p справедливі рівняння [6]

$$R = \frac{0.335\sqrt{2}}{2} \sqrt{R_c L} \quad (3)$$

$$\frac{Z}{R} = \left(1 - \sqrt{\frac{p}{p_c}} \right)^{2/3} \quad (4)$$

де Z – радіальна відстань від осі струменя до точки прикладення еквівалентної гідродинамічної сили, що діє на матеріал.

Підставивши в рівняння (4) величину p_c з рівняння (1) та з врахуванням рівняння (2), отримаємо

$$Z = R \left(1 - \sqrt{\frac{2pL}{p_1 L_n}} \right)^{2/3} \quad (5)$$

Для ефективної частини струменя радіусом R_e радіальна відстань Z_e від її осі до точки прикладення еквівалентної гідродинамічної сили F , що діє на матеріал, з умови руйнування становить

$$R_e = Z_e = R \left(1 - \sqrt{\frac{2HL}{p_1 L_n}} \right)^{2/3},$$

де H – твердість матеріалу.
Враховуючи формулу (3)

$$R_e = 0.24\sqrt{R_c L} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{2HL}{p_1 L_n}} \right)^{2/3} \quad (6)$$

Якщо виразити еквівалентну гідродинамічну силу F , яка руйнує матеріал, через радіальний розподіл динамічного тиску струменя p , то отримаємо

$$F = \int_0^{R_e} p 2\pi Z dZ \quad (7)$$

З іншого боку, силу F можна виразити через середній динамічний тиск p_e , що створюється ефективною частиною струменя

$$\frac{dm(v^2 - v_c^2)}{2} = \int_{L+dh}^L F_c dh \quad (15)$$

де F_c – сила, яка визначається контактним тиском,

$$F_c = \pi HR_e^2 \quad (16)$$

За час dt через вихідний отвір сопла пройде маса рідини

$$dm = \pi R_c^2 \rho_e v_0 dt \quad (17)$$

Після інтегрування і підстановки значення сили F_c з рівняння (16) і dm з (17) вираз (15) приймає вигляд

$$R_c^2 v_0 \left(\frac{pv^2}{2} - \frac{pv_c^2}{2} \right) dt = HR_e^2 dh \quad (18)$$

З отриманої рівності знайдемо час dt , який буде потрібен для руйнування матеріалу товщиною dh

$$dt = \frac{HR_e^2 dh}{(p_e - H) R_c^2 v_0} \quad (19)$$

З рівняння (19) випливає, що повний час проникнення струменя крізь матеріал на другій стадії руйнування дорівнює

$$t_2 = \frac{HR_e^2 (h - h_{yn})}{(p_e - H) R_c^2 v_0} \quad (20)$$

де h_{yn} – глибина пружної деформації матеріалу під дією струменя.

З врахуванням виразу (13) для втрат гідравлічного тиску струменя на тертя об стінки оброблюваного матеріалу рівняння (20) прийме вигляд

$$t_2 = \frac{HR_e^2 (h - h_{yn})}{\left(p_e - 0.25 p_1 \lambda_f \frac{(h - h_{yn})}{R_e} - H \right) R_c^2 v_0} \quad (21)$$

Підсумовуючи значення часу на першій ($t_1 = 1.42 h_{yn}/v_0$) і другій стадіях (21), отримуємо час t наскрізного прорізання матеріалу товщиною h

$$t = 1.42 \frac{h_{yn}}{v_0} + \frac{HR_e^2 (h - h_{yn})}{\left(p_e - \frac{p_1 \lambda_f (h - h_{yn})}{4R_e} - H \right) R_c^2 v_0} \quad (22)$$

За період часу t матеріал переміститься в горизонтальному напрямку на відстань $2R_c$. Тоді, з врахуванням виразів (11) і (12) для швидкості подачі зразка запишемо

$$U = \frac{2R_c}{t} = \frac{2 \frac{R_c \rho_e^{0.5}}{\rho_1^{0.5}}}{h_{yn} + \frac{5.6 \cdot 10^{-2} HL (h - h_{yn}) \varphi^{4/3}}{R_c \left[p_1 \left(\frac{\psi L_n}{L} - \frac{(h - h_{yn}) \lambda_f}{\sqrt{R_e L \varphi^{2/3}}} \right) - H \right]}}$$

Використовуючи отриману залежність нами побудовано, в якості прикладу, визначення швидкості подачі для композиційних (рис.3) та металевих матеріалів (рис. 4, та рис. 5) .

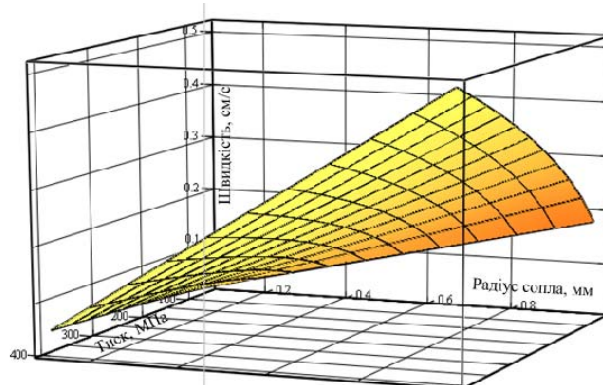


Рис. 3. Діаграма визначення швидкості подачі для композиційних матеріалів товщиною 6 мм

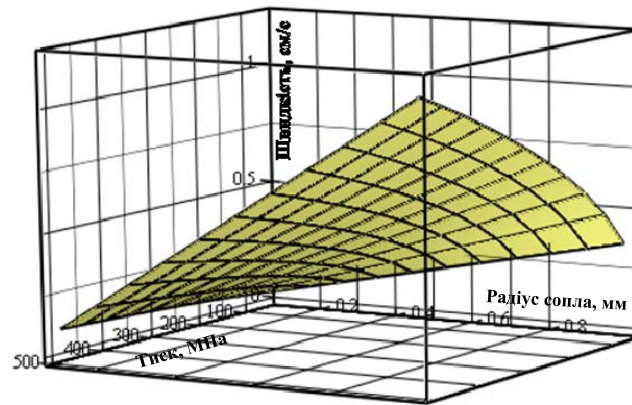


Рис. 4. Діаграма визначення швидкості подачі для листового алюмінію товщиною 5 мм

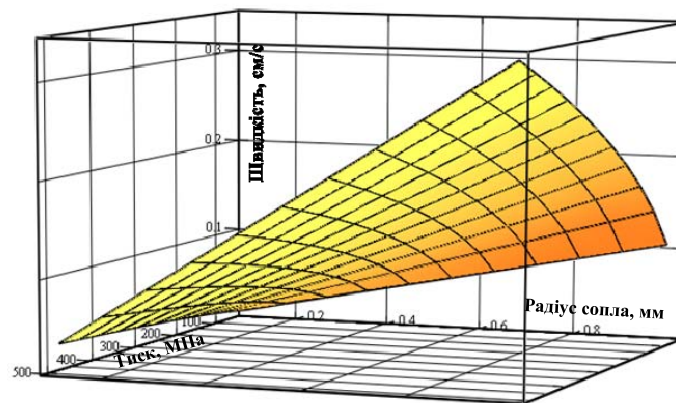


Рис. 5. Діаграма визначення швидкості подачі для листової сталі товщиною 5 мм

При радіусі сопла 0,4 мм та тиску 200 МПа швидкість подачі листового матеріалу під час процесу різання становить: для композиційних матеріалів (рис. 3) 0,2 см/с; для алюмінію 0,3 см/с (рис. 4), для сталі 0,1 см/с (рис. 5).

Висновки

Змінюючи величину тиску робочої рідини або діаметр сопла, тобто змінюючи величину енергії, що подається, на одиницю поверхні матеріалу, можна у кожному конкретному випадку розрахувати тривалість оброблення різних матеріалів, а отже, і продуктивність процесу гідрорізання.

Література

1. Саленко А.Ф. Качество обработки материалов гидроабразивной струей / А.Ф. Саленко, Е.В. Фомовская // Оборудование и инструмент. – Харьков, 2008. – № 6. – С. 12–18.
2. Клапцов Ю.В. Визначення конструктивних параметрів струменеформуючого пристрою / Ю.В. Клапцов, І.В. Панасюк, І.В. Петко // ВІСНИК Хмельницького національного університету. – 2013. – № 3. – С. 115–118.
3. Павленко В.М. Пристрій для підвищення якості гідрорізання листових композитних матеріалів / В.М. Павленко, І. В.Петко // ВІСНИК КНУТД. – 2013. – № 1. – С. 59–63.
4. Петко І.В. Моделювання процесу розрізання матеріалу швидкоплинним струменем рідини / І.В. Петко, І.Б. Чернявський // ВІСНИК КНУТД. – 1992. – № 5. – С. 123–128.
5. Клапцов Ю.В. Розробка струменеформуючих пристроїв для розрізання матеріалів легкої промисловості гідро- та гідроабразивним струменем : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.05.10. – К., 2007. – 20 с.
6. Саленко О.Ф. Гідро- та гідроабразивна обробка: теорія, технологія та обладнання : навч. посібник / О.Ф. Саленко, І.В. Петко, О.В. Третяков. – К. : ІЗМН, 1999. – 488 с. : іл.

Рецензія/Peer review : 1.12.2016 р.

Надрукована/Printed : 12.12.2016 р.

Рецензент: д.т.н., професор Злотенко Б.М.