

О.М. Яхно, д.т.н., завідувач кафедрою, Н. В. Савченко, аспірантка, НТУУ «КПІ»

ГІДРАВЛІЧНІ ПРИНЦИПИ СТРУМІНЕВИХ МЕТОДІВ РІЗАННЯ МАТЕРІАЛІВ

В статті розглянуті існуючі принципи різання матеріалів із застосуванням, як інструменту, що ріже струменя рідини. Досліджено характерні риси формування струменів різного складу у початковій ділянці. Запропоновано методи підвищення продуктивності процесу гідравлічного різання.

Вступ

Здатність тонкого рідинного струменя з надзвуковою швидкістю впливати на оброблюваний матеріал із силою, величина якої достатня для мікрориву часток матеріалу від його основної маси, дозволяє розглядати його, як різальний інструмент. Гідрострумєніві технології, основані на використанні високо-напірних струменів у якості інструменту, є на сьогоднішній день одним з перспективних напрямків розвитку техніки й технології руйнування твердих матеріалів. При застосуванні розглянутих технологій кінетична енергія струменя перетворюється в механічну роботу різання безпосередньо в зоні обробки без застосування, проміжних механізмів – перетворювачів.

Аналіз попередніх досліджень

Роботами по вивченню й дослідженню процесу гідрорізання займаються як в Україні, так і за кордоном. В області промислового застосування водострумєневого різання лідерами є “Smet Jet/Jet Inter”(Бельгія), “Bohler”(Австрія), “Autoclave France” (Франція), “Waterjet Sweden AB”, “Projet AB”, “Cadcraft”, “Sandvik” (Швеція), “BHR Group Limited” (Великобританія), “Flow International Corporation” і “National Liquid Blasting Corporation” (США), «Hammelmann», “Ingersoll-Rand”, “UHDE” (Німеччина), та інші фірми.

Застосування надшвидкісного струменя дає можливість цілком автоматизувати обробку і організувати замкнутий технологічний цикл; значно знизити шум і цілком ліквідувати запиленість робочого місця; виключити з технології циклу механічний різальний інструмент, застосування якого призводить до виникнення термічних і деформаційних напруг в оброблюваному матеріалі, а також супроводжується безупинним зносом його робочих крайок.

Використання струменя як інструменту набуло широкого застосування в таких галузях промисловості, як: машинобудування; авіація і космонавтика; оптика; електроніка; атомна енергетика; нафтова і газова промисловість; конверсія; кораблебудування і мореплавання; харчова промисловість; цивільне будівництво; екологія; гірнична справа; медицина.

Досить широке застосування гідрострумєневих технологій, різноманітність параметрів струменів, методів впливу на оброблюваний матеріал привело до створення різних способів гідрорізання. Класифікація існуючих способів гідрострумєневого різання наведено на рисунку 1.

В даний час експериментально випробувано, а для ряду матеріалів впроваджено в промисловість різання рідинним струменем папера, картону, тканин, деревини, шкіри, гуми, різних пластмасових і керамічних матеріалів, кольорових сплавів, сталей, твердих сплавів. Для різання і обробки матеріалів застосовуються гідроустановки потужністю від 8 до 80 кВт, які забезпечують тиск витікання струменя від 150 до 1000 МПа і вище, що відповідає швидкості струменя від 540 до 1400 м/с.

Можливості ріжучого струменя і характер виконуваних ним операцій залежить від ряду факторів, у тому числі від виду оброблюваного матеріалу, складу робочої рідини, способу впливу на оброблюваний матеріал, напрямку струменя стосовно оброблюваної поверхні.

На здатність руйнуючого струменя впливає склад робочої рідини. Найбільша кількість споживачів гідроустановок вимагає застосування у якості робочої рідини простої неопрацьованої води. Однак її застосування виключене в гідросистемах стандартних насосів, а так само неприйнятне при обробці цілого ряду матеріалів, тому що супроводжується погіршенням фізико-механічних властивостей, останніх при вологопоглинанні. В цих випадках використовують різні спирти. При різанні деяких виробів із необпаленої кераміки у якості робочої рідини найбільш прийнятні промислові оливи.

Підвищення продуктивності гідрорізання можливе за рахунок зміни характеру впливу струменя на матеріал так, наприклад, накладення вібрації на зону різання за допомогою додаткового накладення на матеріал, який подається, відносно струменя вібраційного руху або накладення вібрації безпосередньо на сам струмінь.

Посилення ударного впливу на матеріал можливо і за рахунок створення пульсуючого струменя. Такі струмені відрізняються більшою компактністю, далекобійністю і більш високою силою впливу на оброблюваний матеріал.

З метою збільшення продуктивності гідрорізання необхідно прагнути до наближення взаємодії струменя й оброблюваного матеріалу до умов взаємодії двох твердих тіл. Найбільш ефективного збільшення здатності ріжучого струменя рідини можна досягти введенням у нього абразиву у вигляді порошків, мік-

ропорошків, кварцевого піску і т.п. Так, наприклад, за даними Ш.М. Білка, при введенні в струмінь піску в об'ємній концентрації 8-10 % його руйнуючі властивості зростають у 10-12 разів.

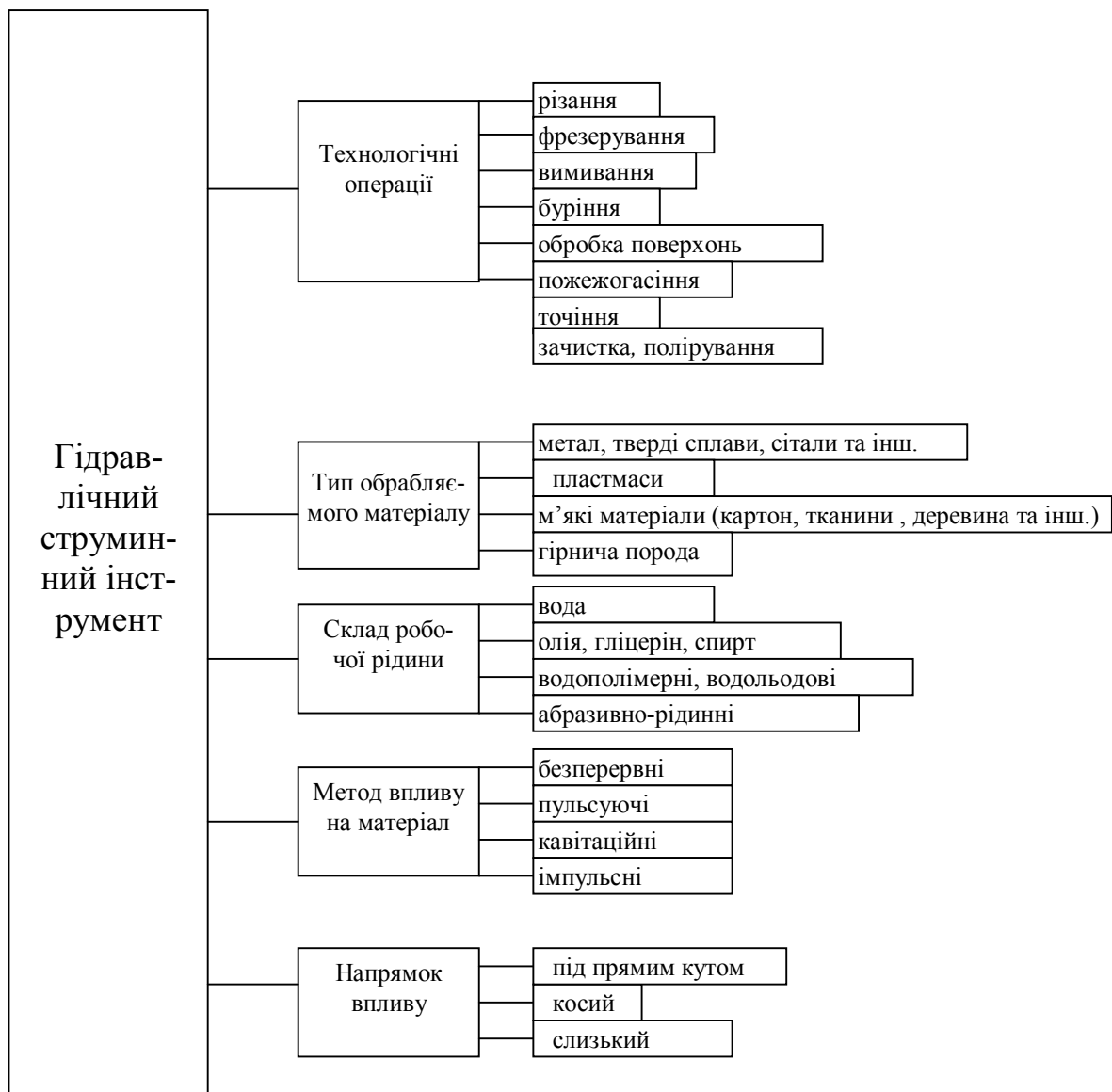


Рис. 1. Класифікація способів гідрорізання по групах

В деяких прикладних задачах використання абразивних матеріалів неможливе у зв'язку з тим, що вони забруднюють оброблюваний матеріал і ускладнюють його подальше використання, наприклад, у медицині, харчовій промисловості чи при утилізації боєприпасів.

Велика кількість експериментальних даних [1, 2] вказує на те, що при введенні в робочу рідину (воду) незначних добавок розчинних лінійних високомолекулярних добавок – полімерів - спостерігається значне підвищення ефективності гідрорізання. Так само, введення полімерів сприяє зниженню турбулентності в потоці і поліпшенню характеристик струменя [4]. При цьому здатність руйнуючого струменя залежить, в основному, від будови молекул рідини і від концентрації добавок. Використання розчинів полімерів сприяє збільшенню терміну служби струминеформуючих пристроїв на 35-40 %. До недоліків варто віднести той факт, що при використанні ряду полімерних розчинів має місце їх деградація за рахунок розігріву рідини до 90°C.

Продуктивність гідрорізання підвищується і при обробці матеріалу в напруженому стані, коли до нього прикладають розтягуючі навантаження, у напрямку, перпендикулярному до подачі матеріалу в межах пружної деформації [2].

На характер виконуваних операцій і продуктивність обробки впливає напрямок струменя на матеріал, або кут атаки. При гідрорізанні можливі наступні схеми впливу струменя рисунок 2.

При $\alpha=90^\circ$ спостерігається ударний вплив струменя, а при $\alpha<90^\circ$ - руйнування косої дії. Зі збільшенням кута атаки від 0° до 90° змінюється характер взаємодії, струменя й об'єкта руйнування, які вступають в контакт, а так само характер напруженого стану матеріалу та інших факторів, які впливають на інтенсивність руйнування поверхневого шару.

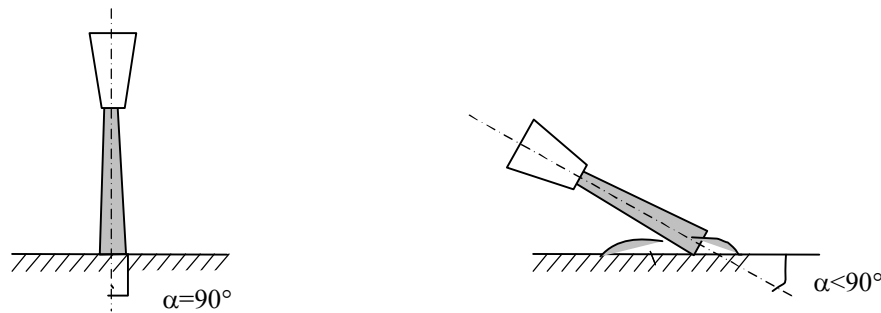


Рис.2. Схеми впливу струменя на матеріал, що обробляється

Постановка задачі досліджень

У данній статті розглянута задача дослідження характерних рис формування струменів різного складу у початковій ділянці та запропоновані методи підвищення продуктивності процесу різання.

Результати досліджень

До основних параметрів гідрорізання, що дозволяє визначити ефективність застосування гідрострумінєвого інструменту, варто відносити:

- енергетичні параметри струменя (тиск рідини, що підводиться, швидкість витікання через струминеформуючу насадку, швидкість переміщення ріжучого інструменту, діаметр насадки, коефіцієнт витрат струминеформуючої насадки, кут конусності, довжина циліндричної частини насадки, довжин початкової ділянки струменя, відстань між зрізом струминеформуючої насадки і оброблюваним матеріалом);
- фізико-механічні властивості матеріалу (опір оброблюваного матеріалу одноосьовому стиску);
- кількість матеріалу, який руйнується в одиницю часу (швидкість переміщення матеріалу щодо струменя, товщина оброблюваного матеріалу і глибина щілини);
- параметри, які визначають умови і характер впливу струменя на матеріал (кут зустрічі струменя з матеріалом, кількість проходів, концентрація полімеру в воді чи концентрація абразиву, частота пульсації тиску витікання струменя чи частота імпульсів при викиді водяних стовпчиків рідини).

Для різних способів гідрорізання матеріалів кількість параметрів, які активно впливають на величину прийнятої подачі, може бути різна.

Однією з основних умов забезпечення високої продуктивності при застосуванні гідрострумінєвої технології, є раціональна конструкція струминеформуючої насадки, яка забезпечує далекобійність (компактність) струменя.

В результаті проведених досліджень [3] різних отворів встановлено, що стабільність гідравлічних характеристик мають отвори всіх конічних і коноїдальних форм, що плавно сходяться, а також коноїдальні отвори, які потім переходять в циліндричні чи конічні форми, які переходять потім у циліндричну форму (рисунок 3). Звуження насадки змінює структуру приграничного шару потоку і його турбулентну кінетичну енергію на виході з насадки. Як стверджують автори праць [1, 2], з метою забезпечення плавного переходу статичного тиску у швидкісний, профіль насадки повинен бути конічним із змінним кутом конусності, що поступово переходить у циліндричну ділянку на кінці. Наявність конічної частини насадки, яка сходиться, перед виходом потоку в атмосферу поліпшує його динамічні характеристики.

Коефіцієнт витрати всіх цих отворів, в данному випадку, $\mu=\mu_{\text{зар}}$ не залежить від тиску на вході і на виході отвору і від фазового стану середовища, у яке відбувається витікання рідини, але залежить від вихідного діаметра сопла, перепаду тиску по перерізу насадки, умов підведення рідини та інших. В ході

проведених експериментів [3] була отримана емпірична залежність коефіцієнта μ від кута конусності на вході в отвір виду

$$\mu = 0,00001172(180 - \alpha_{ex})^2 + 0,62 \quad (1)$$

За критерій оптимізації параметрів насадки, який визначає його найкращий профіль, рекомендується [1-3] брати кут розширення зовнішньої границі струменя, який повинний бути найменший. Відповідно до досліджень Б.В. Войцеховського, найбільша компактність струменя досягається при куті конусності $\alpha_{ex} = 3-4^\circ$.

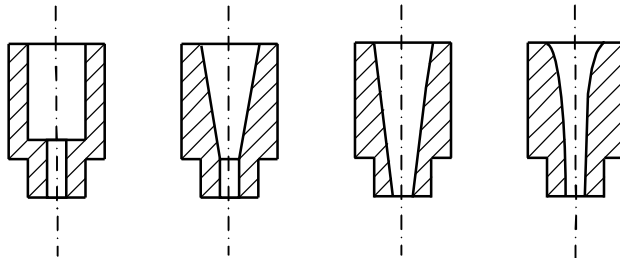


Рис.3. Форми внутрішньої поверхні насадок

Компактність струменя характеризується початковою ділянкою. Довжина початкової ділянки залежить від безлічи факторів, основними з яких є – початкові параметри струменя і умови його формування. Згідно [2] зв'язок між величиною безрозмірної початкової ділянки струменя і числом Рейнольдса, яке характеризує рівень турбулентності потоку води, можна описати залежністю безрозмірної довжини початкової ділянки

$$\frac{l_n}{d_0} = A - B \cdot Re, \quad (2)$$

де A, B – коефіцієнти, що характеризують особливості конструкції насадки, яка формує струмінь;

Re – число Рейнольдса, яке встановлює відношення сил інерції до сили в'язкого тертя і сприяє визначенню закономірності руху а також інтенсивності розпаду струменя.

Необхідно враховувати той факт, що при значенні числа Рейнольдса $\approx 10^6$ сила в'язкості зменшується, і течія в'язкої рідини переходить в автономний режим, у якому гідродинамічна подібність потоків не залежить від числа Re . При цьому співвідношення (2) справедливо тільки в тому випадку коли дотримується умова (3) і використовується ньютонівська рідина:

$$Re < (Re)_a, \quad (3)$$

де $(Re)_a$ – граничне число Рейнольдса при автономному режимі витікання струменів, яке має вигляд [2]:

$$(Re)_a = \frac{10^4 d_0}{\nu(0,3d_0 + 3,5)}, \quad (4)$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості; d_0 – діаметр насадки.

Не вирішеним залишається питання особливостей формування і витікання струменів з полімерними добавками. Якщо не враховувати особливості цих рідин на початковій ділянці, значення швидкості зрушення може досягти деякої критичної величини, при якій гладка поверхня полімеру, що формується, стає грубою і деформованою.

При використанні у якості гідрострумінєвого інструменту, неньютонівських рідин, які мають пружні властивості (водополімерний струмінь), необхідно враховувати реологічні особливості цих рідин, які істотно впливають на картину їхньої течії на початковій ділянці. При течії неньютонівських рідин потік варто розділяти на три зони: зону еластичної твердоподібної течії; зону течії, що розвивається, яка складається з ядра потоку і приграничного шару, а також зону цілком розвиненої течії. Відповідно до досліджень Като-Хіросі можна зробити висновок про те, що механічна робота протікання в'язкопружної рідини через початкову ділянку витрачається не тільки на в'язку дисипацію і зміну кінетичної енергії потоку, але і на накопичування в рідині пружної енергії [4]. Існування пружної енергії в потоці значно позначається на довжині початкової ділянки. У цьому випадку довжина початкової ділянки є функцією не тільки числа Рейнольдса, але і числа Вайсенберга, тобто:

$$l_n = [\gamma(n) \text{Re} + \varphi(n, m)W]H, \quad (5)$$

де $\gamma(n)$, $\varphi(n, m)$ – деякі параметри що характеризують реологічні властивості розглянутих рідин; W – критерій Вайсенберга, який враховує еластичні властивості рідини.

$$W = \frac{K_1}{K} \left(\frac{3v_{xcp}}{H} \right)^{m,n}, \text{Re} = \frac{\rho U_{cp}^{2-n} d^n}{K 8^{n-1}} \quad (6)$$

Підставляючи в рівняння (2) рівняння (5) одержимо залежність (7) що дозволяє визначати довжину початкової ділянки для водополімерних струменів:

$$l_n = (A - \gamma(n) \text{Re} + \varphi(n, m)W)d_0, \quad (7)$$

Слід зазначити можливість «керування» як довжиною гідродинамічної початкової ділянки струменя, так і площею її поперечного перерізу за допомогою електромагнітного поля (за умови електропровідності рідини).

Наявність поперечного магнітного поля сприяє підвищенню втрат енергії потоку за рахунок сил, електричного характеру. Останні, у свою чергу, зв'язані з підвищенням, так названого ефекту магнітної пластичності. Цей ефект впливає на кінематичні і динамічні характеристики струменя. У самому загальному випадку, при наявності поперечного магнітного поля, потік ньютонівської рідини характеризується не тільки числами Рейнольдса і Вайсенберга, але і числом Гартмана [5, 6]:

$$H_a = B_0 \left(\frac{GU^{1-n} d^{n+1}}{K_1} \right)^{0.5} \quad (8)$$

де B_0 - індуктивність магнітного поля, G - провідність.

Таким чином, при наявності поперечного магнітного поля довжина початкової ділянки струменя залежить від наступних критеріїв:

- при застосуванні псевдопластичної рідини $l_n = f(\text{Re}, \text{Re}_w, \mathbf{G})$
- при еластичній $l_n = f(\text{Re}, H_a, W)$

Для еластичних рідин залежність (2) приймає наступний вигляд:

$$l_n = \frac{\text{const}}{H_a} (A - \gamma(n) \text{Re} + \varphi(n, m)W) \quad (9)$$

Висновки

З проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

- основним показником процесу гідрорізання, який характеризує якісне виконання технологічних операцій, є початкова ділянка.
- знаючи та регулюючи параметри та характеристики гідродинамічної початкової ділянки можливо покращити показники різання, а також зробити точний розрахунок геометричних параметрів струминнеформуючої насадки.

Проведені дослідження є основою для розробки та поліпшення процесів гідрорізання.

ЛІТЕРАТУРИ:

1. Бреннер В. А., Жабин А. Б., Пушкарев А. Е. и др. Гидроабразивное резание горных пород. – М.: Издательство Московского государственного университета, 2003.- 279 с.
2. Мерзляков В. Г., Бафталовский В. Е. Физико – технические основы гидроструйных технологий в горном производстве. – М. ННЦП ИГД им. А. А. Скочинского, 2004.- 640 с.
3. Сиов Б. Н. Истечение жидкости через насадки в среды с противодавлением. – М. «Машиностроение», 1968. – 140с.
4. Яхно О. М., Дубовицкий В. Ф. Основы реологии полимеров. – К. «Вища школа», 1976. – 188с.
5. Мартинсон Л. К, Павлов К. Б. Эффект магнитной пластичности в ньютоновских жидкостях, № 3, 1966. – 292с.
6. Бай Ши-и Магнитная гидродинамика и динамика плазмы. – М. «Мир», 1964. – 312 с.

ЯХНО Олег Михайлович; доктор технічних наук, професор; завідувач кафедру «Прикладної гідроаеромеханіки та механотроніки»; Національний технічний університет України «КПІ»; гідромеханіка, тепло та масообмін в процесах та апаратах хімічної технології.

8(044) 241-76-54,

САВЧЕНКО Наталія Валеріївна, аспірантка кафедри “Прикладної гідроаеромеханіки та механотроніки” Національний технічний університет України “КПІ”, дослідження особливостей формування імпульсного струменя у насадках, для рідин різного складу.
8(044) 454-96-14

О.М. Яхно, Савченко Н. В.

Гидравлические принципы струйных методов резания материалов.

В статье рассмотрены существующие принципы резания материалов с применением в качестве режущего инструмента струи жидкости. Исследованы характерные особенности формирования струй различного состава на начальном участке. Предложены методы повышения производительности процессов резания.

In paper an exist principles of cutting of the material with using of fluid-jets as an instrument are presented. The characteristic features of jet forming for jets with different structure of the beginning length are investigated. Methods of productivity increase of cutting process are proposed.