

**М.Й. Бондаренко**, асист.  
**І.В. Петко**, д.т.н., проф.  
*Київський національний університет технологій та дизайну*  
**В.І. Приходько**, дир. АТ  
**О.Ф. Саленко**, к.т.н., доц.  
*Кременчуцький державний політехнічний університет*

## ГІДРОСТРУМЕНЕВЕ ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХНІ ТВЕРДОГО ТІЛА

*У роботі розглянуті питання гідроструменевого очищення поверхні твердих тіл від різних забруднень, сформульовано принципове представлення авторів відносно механізму дії струменю на забруднення, отримано залежність площі очищеної поверхні у вигляді функції характеристик забрудненості.*

### **Прийняті позначення:**

$r_c$  – радіус струменя рідини;  $p_c$  – тиск у системі;  $K_v$  – коефіцієнт відміни головної частини струменя від циліндричної,  $K = 1...4$ ;  $C$  – швидкість розповсюдження ударної хвилі в рідині, що приймається прирівненій швидкості звуку в рідині;  $K_c$  – коефіцієнт стиснення рідини;  $\rho$  – густина рідини;  $v_c$  – швидкість витікання струменя;  $K$  – коефіцієнт, що враховує властивості робочої рідини та швидкість удару хвилі по перепоні;  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  – відповідно нормальні, радіальні та тангенціальні напруги;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\mu'$  – коефіцієнт Пуассона для поверхневого шару, що підлягає розвантаженню після пружно-пластичного деформування;  $R$  – плинне значення радіуса розтікання потоку рідини по поверхні тіла;  $T_m$  – міцність покриття або забруднення (для твердих та пластичних шарів);  $\lambda_l$  – коефіцієнт гідравлічного опору;  $l_k$  – плинна відстань від контактної площинки до сопла;  $l_n$  – довжина початкової ділянки струменя;  $p_0$  – динамічний тиск на виході з сопла;  $H_y$  – початкова величина пружного переміщення оброблюваної поверхні під дією швидкоплинного струменя;  $\zeta$  – коефіцієнт витрати через сопловий насадок;  $d$  – діаметр отвору у насадку.

### **Струменеві технології серед інших методів очищення поверхонь**

Питанням якісного очищення поверхонь від різного роду забруднень, у тому числі і від продуктів механічної обробки, присвячено багато робіт, зокрема, [2], [5], [6]. Відповідно до розглянутих джерел, весь загальний традиційних способів очищення, що використовують як рідину робоче тіло, можна поділити на чотири групи: прямопоточне миття виробів з додаванням поверхнево-активних компонентів та сполук; обробка виробів у ваннах з ущільненим або вільним абразивом; ультразвукове миття; струменеві методи очищення.

При цьому з поверхні деталі, як правило, видаляються мастильно-жирові плівки, а у деяких випадках – продукти механічної обробки (задири, залишки стружки тощо). Часто, якщо деталі вже працювали в механізмі, а під час ремонту виникла необхідність провести профілактичні роботи, виникає потреба видаляти також лакофарбові покриття, адгезійні антикорозійні покриття, смолові відкладення, шлаки та інші сполуки, що виникли на поверхні внаслідок роботи деталі. Залежно від типу забруднення, виду поверхонь, що підлягають очищенню, габаритів, маси виробів та можливостей конкретного виробництва використовують ту чи іншу технологію очищення.

Сутність прямопоточного миття пояснює схема, наведена на рис. 1. Зазначений спосіб очищення має найбільше розповсюдження і використовується у різних галузях народного господарства.

Оброблювані деталі 1 надходять на кільцевий транспортний засіб 2 (конвеєр), що повільно переміщує деталі зі швидкістю  $s_p$  у камеру очищення 3, у верхній частині та з обох боків якої встановлені гідравлічні форсунок 4. Рідина, що витікає з форсунок під тиском 0.4 – 0.65 МПа, досягає поверхні та виконує змив забруднення. Далі вона прямує до збирального резервуара 5, в якому відбувається її попередній відстой. З резервуару 5 через систему фільтрів та уловлювачів продуктів забруднення і видалення їх з рідини 6 остання надходить до помпової станції 7, звідкіля знову прямує до гідравлічних форсунок 4. Отже, циркулюючи у замкненому

колі, рідина виконує змив забруднення. Звичайно, у такий спосіб можна видалити лише забруднення та плівки, котрі не мають значного силового зчеплення з поверхнею: жирові плівки значної товщини, залишки змащувально-охолоджувальної рідини, частки стружки та ін. При цьому за миючу рідину використовують водний розчин поверхнево-активних сполук, а для підвищення ефективності миття розчин підігрівають до температури 80–95 °С. Така технологія негативно відбивається на стані навколишнього середовища, створює тяжкі умови праці обслуговуючого персоналу (при підвищеній температурі йде часткове випаровування поверхнево-активних сполук; інколи ці сполуки можуть викликати дерматози та захворювання шкіри).

Головними недоліками такого способу очищення слід вважати випадковий характер ведення обробки (внаслідок того, що інтенсивність впливу струменів рідини на певні ділянки поверхонь буде різною, в залежності від розташування деталей, типу поверхонь, тиску рідини тощо), неможливість здійснювати якісне очищення поверхонь з піднутріннями, поверхонь без вільного доступу струменя. Використання підігрітого розчину (для активізації хімічних реакцій поверхнево-активних сполук) вимагає організації ділянки термостабілізаційних накопичувачів чистих деталей, особливо, коли останні мають підвищену точність.

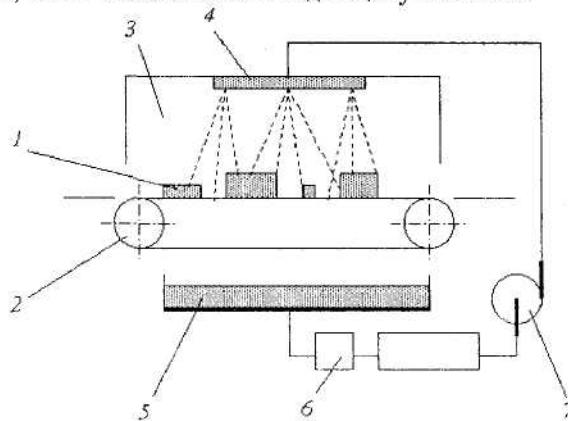


Рис. 1. Схема прямопоточного миття деталей

Досвід експлуатації такого устаткування свідчить, що отримана якість очищення поверхонь часто недостатня для задоволення технологічних вимог сучасного виробництва. Інколи технологією також передбачаються ручні операції, що вимагає від виробника додаткових трудових та матеріальних витрат.

Обробка у ваннах з ущільненим або вільним абразивом [6] принципово відрізняється від розглянутої обробки: у цьому випадку для видалення забруднення з поверхні окрім хімічного розчину та динамічного впливу рідини використовується енергія рухомих часток абразиву. Зазвичай, такий спосіб дозволяє очистити поковки та відливки, видалити смолві відкладення, лакофарбові покриття, адгезійні покриття – іншими словами, міцно зчеплені шари стороннього матеріалу. Однак необхідно пам'ятати, що неточне встановлення потрібних режимів ведення обробки може призвести до зміни параметрів поверхневого шару деталі, особливо для відносно м'яких матеріалів: міді, алюмінієвих сплавів та ін.

Незважаючи на велику кількість конструкцій апаратів для миття деталей ущільненим абразивом, практично у кожній з них абразив у вигляді суспензії по магістралі надходить до спеціального пристрою – ежекційної головки, з якої стисненим повітрям направляється до оброблюваної поверхні деталі. Після цього суспензія повертається у камеру регенерації рідини і прямує до резервуару, з якого технологічна рідина знову насичується абразивом і подається до ежекційної головки. Практично всі установки, як вже зазначалося, не тільки дозволяють вилучати з поверхні забруднення, але й частково порушують поверхневий шар деталі чи виробу. Це обмежує можливості використання даного методу очищення: його не можна використовувати для обробки точних та якісних поверхонь, а також у тому разі, коли необхідно підтримувати поверхневий шар без залишкових мікрodefektів. Як і у випадку прямопоточного миття, інтенсивність впливу потоку суспензії, що надходить до оброблюваних поверхонь, не є постійною, а це не дозволяє забезпечувати надійну обробку виробів в

автоматичному або напівавтоматичному режимах з мінімальними енерговитратами, особливо коли останні мають складну форму, з піднутріннями, пазами тощо.

Ультразвукове миття є одним з найбільш якісних способів очищення поверхонь без руйнування поверхневого шару. Її сутність полягає у тому, що на поверхню виробу, зануреного у ванну, спрямовуються ультразвукові хвилі, які викликають виникнення у рідині малих кавітаційних порожнин. Видалення забруднення протікає одночасно за двома схемами: від дії гідродинамічного пульсуючого тиску та від схлопування газових мікропорожнин на оброблюваній поверхні. У результаті спостерігається серія поверхневих мікроривів, що досить активно видаляє будь-яке, навіть міцне, забруднення. Звичайно, при незначному часі ультразвукового впливу поверхневий шар матеріалу (наприклад, сталі) не страждає, однак тривалий вплив може призвести до появи втомлених тріщин.

Схема ультразвукової ванни для очищення робочих сіток авіаційних фільтрувальних елементів наведена на рис. 2.

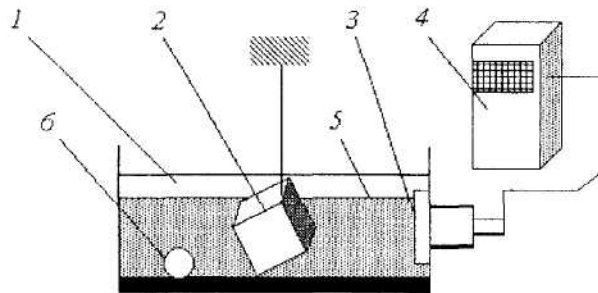


Рис. 2. Схема ультразвукової ванни для очищення робочих сіток авіаційних фільтрувальних елементів

Пристрій являє собою ванну 1, заповнену очищувальним розчином (як правило, з додаванням поверхнево-активних сполук), в яку занурюють оброблювану деталь чи виріб 2. З торця ванни змонтований магнітострикційний або п'єзоелектричний перетворювач 3, що живиться енергією від генератора ультразвукових коливань 4. Хвилі 5, які виникають, досягатимуть поверхні та виконуватимуть очищення, а видалений бруд збирається з допомогою системи очищення рідини 6.

Недоліками цієї системи можна вважати шкідливі умови праці обслуговуючого персоналу, обмежені габарити виробів, що підлягають очищенню, низька продуктивність виконання обробки.

Найбільш перспективними можна вважати саме струменеві методи очищення. Відомо, що гідроструменева обробка – це технологічна операція керованого впливу на заготовку визначено сформованим струменем рідини високого тиску, здатним виконувати пружно-пластичне та в'язко-пластичне деформування мікрообсягів з можливим наступним їх відокремленням від основної маси матеріалу. Таким чином, тільки за рахунок потрібного тиску та витрат рідини маємо змогу видаляти забруднення, не використовуюючи розчинників, поверхнево-активних сполук тощо.

Цей метод починає набувати значного розповсюдження завдяки істотним перевагам над розглянутими методами: висока продуктивність обробки забезпечується при відносно малих енерговитратах, видаленню можуть підлягати практично всі типи забруднень, покриттів та захисних шарів (наприклад, термо- та антикорозійна ізоляція магістральних трубопроводів), оброблювана поверхня залишається практично з початковими параметрами якості, при експлуатації струменевого устаткування не створюється загроза для оточуючого середовища та обслуговуючого персоналу тощо. Вперше водоструменеву технологію очищення складнопрофільних поверхонь було впроваджено німецькою фірмою "Люфт Ганза" на ремонтних підприємствах компанії. Так, з допомогою струменя води із зовнішньої поверхні лайнерів змивалося старе лакофарбове покриття, причому оператор міг добиватися пошарового змиву: лаку, фарбованого шару, прошарків, підложки. Традиційно цю операцію виконували з допомогою розчинника та скребоків.

Як правило, для переважної більшості робіт достатньо створити тиск 25...80 МПа при витраті до 30 дм<sup>3</sup>/хв. Робочим тілом може бути як чиста вода, так і водна емульсія з

домішками поверхнево-активних сполук. Робочим інструментом у більшості технологій є роторні головки, що обертаються з високою швидкістю довкола своєї центральної осі та дозволяють виконувати очищення поверхні двома або кількома водяними струменями, подібно до схеми торцевого фрезерування. Однак інколи при виконанні очищень точних або складних поверхонь можуть використовуватися і монострумені. Технологія практично у всіх випадках має замкнений цикл водообігу, що забезпечує високу екологічну чистоту методу. Інколи процес миття автоматизують, створюючи спеціальні гідроструменеві комплекси.

У цьому випадку заготовці або струменевій головці надають рух подачі  $s_x$  та  $s_y$ , у результаті чого гідровплив визначеної інтенсивності буде перенесено на всю поверхню. Слід відзначити ту особливість, що не всі участки оброблюваної поверхні знаходяться у рівних умовах: у випадку використання струменя з нахилом (що характерно для поверхонь, розташованих під деяким кутом до основних осей та для складнопрофільних поверхонь, а також внутрішніх поверхонь) його ядро найактивніше буде впливати на точку наведення струменя, але після відбиття від поверхні шлейф струменя продовжуватиме впливати на поверхню на участку, що передує обробці, а також на вже обробленому участку (зони **В** та **С**), причому площа цих участків залежатиме від напрямку руху подачі. Зауважена особливість повинна враховуватися при визначенні параметрів якості виконаної обробки.

Використання роторної головки (рис. 3) дозволяє не тільки підвищити продуктивність обробки в цілому, але й забезпечує створення регулярної сітки напрямів гідровпливу, що в деяких випадках стабілізує отримані вихідні параметри поверхні.

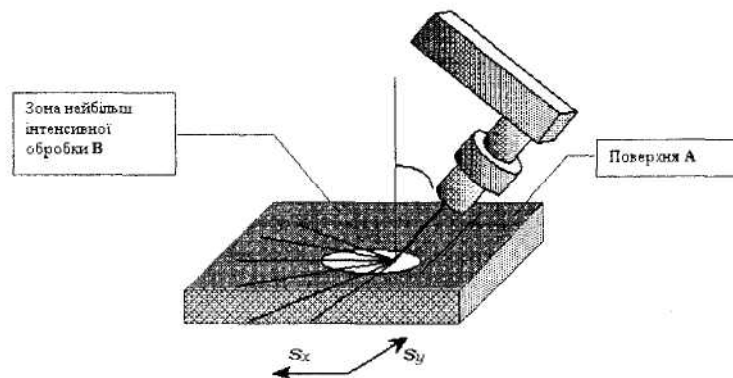


Рис. 3. Поверхнева гідроструменева обробка

Однак до теперішнього часу не існує науково обґрунтованих інженерних методик розрахунку режимів ведення обробки, що значно обмежує використання струменевих технологій у промисловому комплексі країни. Авторами зроблено спробу ліквідувати цей недолік та сформулювати основні підходи до розв'язання вказаної проблеми на підставі теоретичних та експериментальних досліджень процесу струменевого очищення поверхонь твердих тіл від різних забруднень та покриттів.

### **Механіка струменевого руйнування забруднень**

Умовно забруднення можна поділити на три групи – в'язкотекучі, до яких відносяться жири, мастильні та слабкоконсистентні покриття; пластичні – смоляні, поліетиленові, парафінові шари, лако-фарбові покриття; тверді – оксидні плівки, емалеві покриття, корозійний наліт тощо.

Розглянемо процеси, що протікають при видаленні твердих та пластичних забруднень [3]. Вважаємо, що на поверхні, яка являє собою площину, знаходиться лише один шар, а вісь струменя рідини перпендикулярна до оброблюваної площини. При цьому матеріал набагато твердіший за видалене покриття.

Дослідження взаємодії швидкоплинного струменя з оброблюваним матеріалом (рис. 4) довели, що струмінь здатний виконувати руйнівну роботу в разі, коли середній динамічний тиск  $p_e$ , обчислений за формулою:

$$p_e = p_o \frac{l_H}{l_k} \left[ 0.5 - 0.57 \left( \left( 1 - \sqrt{\frac{2T_m l_k}{p_o l_H}} \right) + 0.2 \left( 1 - \sqrt{\frac{2T_m l_k}{p_o l_H}} \right)^2 \right) \right], \quad (1)$$

де

$$r = 0.237 \sqrt{r_c l_k} \left( 1 - \sqrt{\frac{2T_m l_k}{p_o l_H}} \right)^{2/3},$$

перевищуватиме межу міцності  $T_m$  оброблюваного матеріалу. Час, що потрібний для повного видалення товщини  $h$  матеріалу, може бути визначений із залежності:

$$t = 1.42 \frac{H_y}{v_c} + \frac{T_m r^2 (h - H_y)}{\left( p_e - \frac{0.25 p_o \lambda_1 (h - H_y)}{r} - T_m \right) r^2 v_c}. \quad (2)$$

Однак, у тому випадку, коли середній динамічний тиск недостатній для початку процесу руйнування, в струмені виникає поперечно розтічна хвиля [7], швидкість руху якої може навіть перевищувати швидкість витікання струменя з сопла. Причому, розтікання рідини відбувається через деякий час

$$t_d = \frac{2r_c K_v v_c}{C^2}, \quad (3)$$

зі швидкістю, що дорівнює

$$u_p = \sqrt{\frac{2p_c}{K_c \rho}}. \quad (4)$$

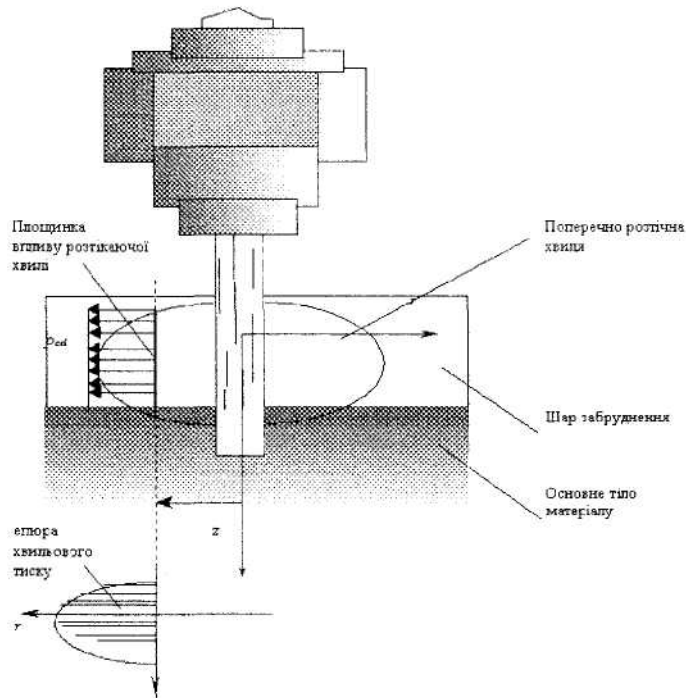


Рис. 4. Схема видалення забруднення поперечно-розтічною хвилею

Середній динамічний тиск, що утворюється на нормально орієнтованій до поверхні перешкоді розповсюдження хвилі, може бути обчислений залежністю:

$$p_{cd} = 1.4K\rho C u_p, \quad (5)$$

де  $K = 1.5-1.8$ .

Отже можна вважати, що для визначених режимів витікання струменя зі струменеформуючого соплового насадка відбуватиметься руйнування адгезійного покриття або високоміцного забруднення без руйнування самої поверхні, особливо коли межі міцності забруднення та оброблюваної заготовки значно відрізняються. Окрім того, слід очікувати

розвиток процесів видалення шару не тільки у безпосередній близькості від дії струменя, а також на деякому участку, де активно діє поперечно-розтічна хвиля.

У цьому випадку на поверхні у зоні прямого впливу гідроструменя виникнуть напруги, визначити які можна, використавши рішення задачі Бусінеска для напруг у точках, розташованих на осях  $z$  (за умови пружного деформування матеріалу), за умови впливу зовнішніх поверхневих сил  $P_c$ :

$$\begin{aligned} \sigma_z &= P_c \left( -1 + \frac{z^2}{(r^2 + z^2)^{1.5}} \right), \\ \sigma_r = \sigma_\theta &= \frac{P_c}{2} \left( -(1 + 2\mu) + \frac{2(1 + \mu)z}{(r_m^2 + z^2)^{0.5}} - \frac{z^3}{(r_m^2 + z^2)^{1.5}} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Якщо прийняти припущення, що матеріал оброблюваної поверхні нестискуваний (а це ймовірно при тих значеннях тиску робочої рідини, що використовуються для гідроструменевого очищення), то остаточні напруги у поверхневому шарі визначаються наступним співвідношенням:

$$\sigma_r^o = \sigma_\theta^o = P_c \left[ (\mu - \mu') - \frac{\mu - \mu'}{(r_m^2 + z^2)^{0.5}} z \right], \quad (7)$$

де  $\mu = 0.2-0.3$ ,  $\mu' = 0.5$ .

Обчислені за поданими формулами остаточні напруги на поверхні після гідроструменевого очищення повинні бути мінімальними, особливо при очищенні тонких оболонкових виробів.

Одночасно з хвильовим процесом буде відбуватися процес розтікання рідини струменя по поверхні. Причому, слід зазначити, що виникнення струменя відбудеться тільки в початковий момент часу, коли струмінь досягне поверхні, а також у тому разі, коли з соплового насадка буде витікати пульсуєючий струмінь, у той час коли розтікання рідини по поверхні буде перетікати протягом усього періоду впливу струменя.

Опис розтікання рідини може бути відображений при прийнятті точки впливу струменя на нормально орієнтовану до осі струменя поверхню за точку потенціального джерела [4]. У цьому випадку проекції швидкості в полярних координатах визначаються співвідношеннями:

$$u_r = \frac{Q}{2\pi R h}; \quad u_\theta = 0, \quad (8)$$

Тож маємо, що швидкість руху зворотно-пропорційна відстані від центра джерела. Середній тиск при безперервному натіканні потоку рідини на перенону можна отримати за відомою формулою [1]:

$$p_p = 0.5 \rho u_r^2 + \rho Q u_r. \quad (9)$$

Співставляючи цей тиск з межею міцності забруднення, що видаляється, можна віднайти критичний радіус на поверхні, на якому видалення забруднення припиниться. На наведених нижче графіках (рис. 5) показано зміни швидкості руху рідини  $u$  та тиску  $p$  у розтічному потоці в залежності від відстані  $R$  від точки контакту струменя з оброблюваною поверхнею.

Тому ймовірно припустити, що зона дії розтікаючого потоку рідини матиме визначену площу, яка повинна враховуватися при розрахунку режимів очищення поверхонь, а саме: при визначенні повздовжньої та кругової подач. Причому, вигляд кола зона дії або елементарна очищена поверхня прийме лише за умови перпендикулярності натікання струменя на поверхню. В іншому разі (при косому падінні струменя) коло буде перероджуватися у еліпс, а екіпотенціали швидкості будуть являти собою сукупність еліпсів.

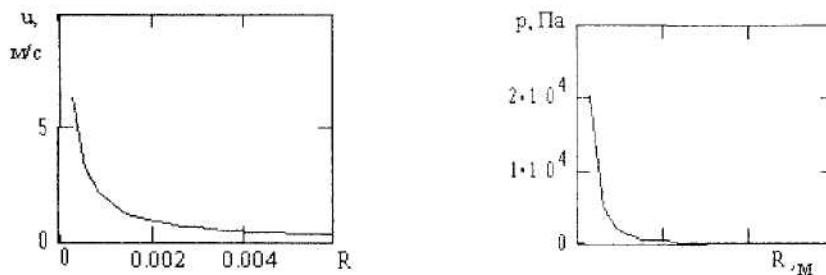


Рис. 5. Зміна швидкості  $v$  [м/с] та тиску  $p$  [Па] розтічного потоку рідини на поверхні зі зміною радіуса  $R$  [м]

У разі видалення в'язких, консистентних та високопластичних забруднень актуальною можна вважати задачу обчислення швидкості зміни площі елементарної очищеної поверхні, що виникає за умови нерухомості струменя. Зрозуміло, що видалення шару забруднення безпосередньо під площиною гідроструменевого впливу відбувається за вже розглянутою схемою. Подальша взаємодія струменя з забрудненням може відбуватися за двома схемами (рис. 6).

Після видалення забруднення на площині безпосереднього впливу струменя радіусом  $r_m$  починається розтікання рідини по поверхні в'язкого шару з градієнтом швидкості  $u$ . При цьому потік рідини утворює гідродинамічний тиск на площині  $A$ , розташованій під деяким кутом  $\xi$  до оброблюваної поверхні.

Останній викликає виникнення у шарі забруднення дотичних напруг  $\tau$ , при перевищенні критичного значення яких відбувається зсувне деформування та течія забруднення. Це перша схема взаємодії. Оцінивши утворений потоком тиск, можна записати формулу, що пов'язує швидкість течії забруднення з режимами витікання струменя (як потенціального джерела):

$$u_1 = \frac{h_1(0.5\rho u^2 + \rho Q u) \sin \xi}{\mu_1} \quad (10)$$

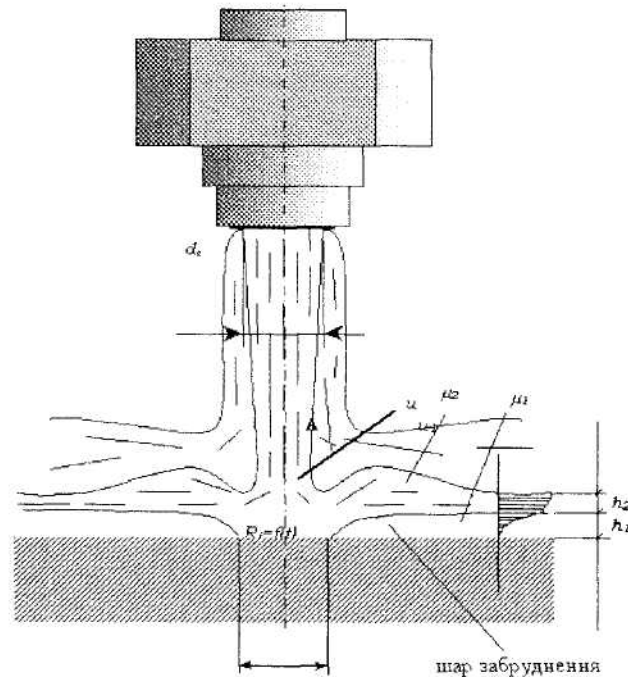


Рис. 6. Схема взаємодії струменя з в'язкопластичним забрудненням

Обчислення за формулою пов'язані з труднощами визначення кута нахилу площини  $A$ , межі забруднення на оброблюваній поверхні.

Одночасно з динамічним впливом течії технологічної рідини в'язкістю  $\mu_2$  шаром товщиною  $h_2$  в перетині на відстані від центра струменя  $r_i$  буде викликати деяку силу тертя, що для шару рідини при відсутності градієнта тиску (а саме така схема може бути прийнятою за умови розтікання рідини по поверхні) обумовить виникнення в перетині дотичних напруг, котрі стаповитимуть:

$$\tau_0 = \frac{\mu_2 u}{h_2}$$

Утворена на межі розділу шарів сила тертя викличе течію в'язкого шару забруднення зі швидкістю  $u_1$ . Це друга схема взаємодії. При цьому справедливе співвідношення:

$$\frac{\mu_1 u_1}{h_1} = \frac{\mu_2 (u - u_1)}{h_2}$$

Тож для співставних шарів розтічного потоку та забруднення можна визначити швидкість переміщення в'язкого шару за формулою:

$$u_1 = \frac{\mu_2 h_1}{\mu_1 h_2 + \mu_2 h_1} u \quad (11)$$

На рис. 7 наведений графік співвідношень швидкостей при одиничній товщині шарів та відношенні динамічних в'язкостей  $\mu_1/\mu_2 = 15$ . Але насправді видалення забруднення буде протікати водночас зі зменшенням товщини шару  $h_1$ . Це буде призводити до зменшення швидкості видалення забруднення та остаточного його припинення. Тому явище залишку на поверхні остаточної тонкої плівки від в'язких забруднень може пояснюватися саме розглянутою схемою очищення.

Для виконання інженерних розрахунків доцільно використовувати спрощені емпіричні формули, що з достатнім ступенем точності дозволяють визначити основні параметри виконання обробки. Одночасно, у випадку видалення в'язких та лаково-фарбових покриттів, деякі питання змиву забруднень залишаються невивченими, що потребує проведення додаткових емпіричних досліджень.

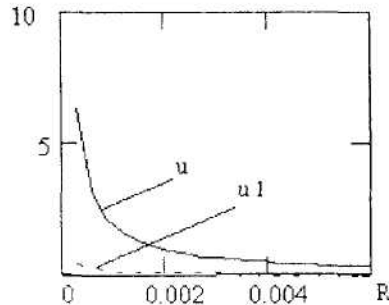


Рис. 7. Залежність швидкості розтікання по поверхні технологічної рідини ( $u$  [м/с]) та видалення в'язкого забруднення ( $u_1$ ) від плинного віддалення  $R$  [м] відносно центра (за умови однакової товщини шару)

Однак, незважаючи на ряд суттєвих спрощень, формула (11) дозволяє визначити швидкість видалення в'язкого забруднення у межах певного участка біля точки безпосереднього впливу струменя на поверхню. Швидкість переміщення точки прикладення струменя (робочу подачу) можна визначити, проаналізувавши, як змінюється інтенсивність видалення забруднення з плином часу.

Так, для опису зміни площі очищення протягом певного часу від дії розтічного потоку у випадку видалення в'язкого забруднення можна припустити, що ця площа  $F$ , виражена для випадку нормального падіння струменя на поверхню через радіус  $R$ , буде залежати від швидкості розтічного струменя  $u$  або витрати рідини  $Q$  (з урахуванням того, що швидкість розтікання прямо пропорційна витраті), товщини забруднення, співвідношення в'язкостей та часу прикладання струменевого навантаження:

$$R = f\left(\frac{\mu_2}{\mu_1}, h, Q, t\right) \quad (12)$$

У той же час відомо, що для витрати існує наступна залежність:

$$Q = \zeta f \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} = \zeta \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho} p_c} \quad (13)$$

Тож цілком ймовірно припустити, що зона видалення забруднення буде залежати як від тиску  $p_c$ , так і від геометричних параметрів струменеформуючого соплового насадка, зокрема,  $d_c$ .

Якщо припустити, що швидкість видалення забруднення буде визначатися швидкістю розтічного потоку, яка буде викликати течію забруднення по поверхні з визначеною епіюрою швидкостей, то відповідно до роботи [4] маємо питому витрату забруднення через одиничний перетин  $s = 1 \cdot h$ :



$$q = \int_0^h u du = \frac{1}{2} u_1 h_1,$$

а для повного кругового перетину радіусом  $R$

$$Q_1 = \pi R h_1 u_1. \tag{14}$$

Підставивши в останнє рівняння значення швидкості руху шару забруднення  $u_1$ , маємо для першої схеми взаємодії:

$$Q_1 = \pi R \frac{h_1^2 (0.5 \rho u^2 + \rho Q u) \sin \xi}{\mu_1}; \tag{15}$$

для другої схеми:

$$Q_1 = \pi R h_1 \frac{\mu_2 h_1}{(\mu_1 h_2 + \mu_2 h_1)} \frac{Q}{2 \pi R h_2} = \frac{Q}{2} \frac{\mu_2 h_1^2}{(\mu_1 h_2^2 + \mu_2 h_1 h_2)}. \tag{16}$$

Отже, маємо, що витрата забруднення залежить тільки від співвідношень товщин шарів та від в'язкостей технологічної рідини і забруднення та визначається витратою технологічної рідини. Обсяг видалення визначиться як

$$w = Q_1 \cdot t = \pi R^2 h_1, \tag{17}$$

що дає змогу визначити зміну радіуса очищеної поверхні як функцію часу:

для першої схеми взаємодії:

$$R = \frac{Q_1 t}{h_1} = \frac{h_1 (0.5 \rho u^2 + \rho Q u) \sin \xi}{\mu_1 h_1} t. \tag{18}$$

Формулу (18) після підстановки значення  $u$  та деяких перетворень можна представити у наступному вигляді:

$$\frac{R^3}{1 + 4 \pi R h_2} = \frac{Q^2 \rho}{8 \mu_1 \pi^2 h_1 h_2^2} t \sin \xi.$$

Знаменник лівої частини рівняння являє собою суму, одна зі складових якої є достатньо малою величиною, що дозволяє нехтувати нею. У цьому випадку після спрощення маємо наступну формулу:

$$R = \sqrt[3]{\frac{Q^2 \rho}{8 \mu_1 \pi^2 h_1 h_2^2} t \sin \xi}; \tag{19}$$

для другої схеми взаємодії залежність буде мати вигляд:

$$R = \sqrt{\frac{Q_1 t}{\pi h_1}} = \sqrt{\frac{\mu_2 h_1}{2 \pi (\mu_1 h_2^2 + \mu_2 h_1 h_2)} Q t}, \tag{20}$$

або у загальному вигляді:

$$R_g = f(t) = \sqrt[3]{\frac{1}{8 \mu_1 \pi^2 h_1 h_2^2} \zeta^2 \frac{d^4}{8} p_c t \sin \xi};$$

$$R_t = f(t) = \sqrt{\frac{\mu_2 h_1}{2 \pi (\mu_1 h_2^2 + \mu_2 h_1 h_2)} \zeta \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}} p_c t}.$$

З урахуванням того, що у початковий момент часу видалення забруднення здійснюється із-за прямого втиснення струменя рідини радіусом  $r_c$ , останні формули дещо зміняться:

$$R_g = f(t) = r_c + \sqrt[3]{\frac{1}{8 \mu_1 \pi^2 h_1 h_2^2} \zeta^2 \frac{d^4}{8} p_c t \sin \xi}, \tag{21}$$

$$R_t = f(t) = r_c + \sqrt{\frac{\mu_2 h_1}{2 \pi (\mu_1 h_2^2 + \mu_2 h_1 h_2)} \zeta \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}} p_c t}. \tag{22}$$

Аналіз формул (21) та (22) показує, що зміна радіуса очищеної поверхні з плином часу за першою схемою відбувається динамічніше, зі швидким зменшенням приросту радіуса. Окрім того, динамічний тиск у міру віддалення від точки прикладення струменя різко зменшується, що дає можливість прогнозувати руйнування шару забруднення за такою схемою лише на

участку, розташованому у безпосередній близькості до точки контакту. Вплив розтічного потоку має більше розповсюдження по поверхні, радіус очищення змінюється менш динамічно, та збільшується триваліший час, що необхідно враховувати при визначенні швидкості переміщення точки прикладання струменя.

Істотний вплив мають також і режими формування та витікання струменя, тип забруднення та його товщина. Зміна діаметра струменеформуючого отвору лінійно впливає на зростання текучого радіуса очищення за умови постійності інших факторів. Співвідношення товщин та в'язкостей має практично однаковий ступеневий вплив, у той час як зміна тиску в камері мультиплікатора впливає на зміну радіуса участка очищення найменше. Зміну радіуса очищення з плином часу, що обчислено за поданими залежностями та визначено експериментально, наведено на рис. 8.

З представлених графіків видно, що для різних умов виконання обробки можна визначити такий радіус кола очищення  $R_0$ , після якого подальше його збільшення потребує значного часу. Такий радіус та час  $t_0$ , потрібні для його досягнення, можна вважати оптимальними.

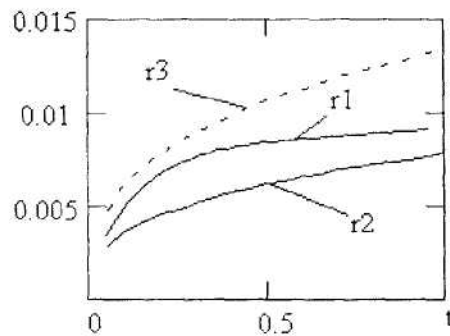


Рис. 8. Залежність зміни радіуса очищеної поверхні з плином часу для більш в'язких ( $r1$ ) та менш в'язких ( $r2$ ) типів забруднень, [м]; (час виражений в [с], обробка проведена сопловим насадком з  $d_c = 0.1$  мм, витрата становила  $12 \text{ см}^3/\text{с}$ );  $r3$  – експериментальна крива

Однак наведені міркування стосуються тільки випадку, коли розтікання рідини по оброблюваній поверхні відбувається у режимі, близькому до ламінарного. В інших умовах, при високих швидкостях витікання рідини з струменеформуючого сопла рух рідини по поверхні буде відбуватися у турбулентному режимі, що змінить механіку видалення забруднення: істотний вплив буде здійснювати гідродинамічний тиск розтічної рідини, а виніс продуктів руйнування буде відбуватися за рахунок масопереносу часток речовини.

### Експериментальні дослідження

Одним з головних питань при розробці технологій струменевого очищення поверхонь від в'язких та консистентних забруднень, а також при проектуванні спеціального обладнання, є забезпечення високої ефективності обробки з дотриманням заданих параметрів якості (чистоти поверхні, мінімуму остаточних напруг та ін.) при мінімальних витратах енергоносіїв, технологічної рідини та машинного часу. Розв'язанню цього питання сприяє правильний вибір режимів ведення обробки (тиску рідини в магістралі високого тиску, її витрати, встановлення доцільної поступової подачі), визначення раціональної схеми гідровпливу, використання спеціальних пристроїв, зокрема, роторних головок тощо.

Розглянемо процес очищення поверхні у динамічній постановці. Нехай струмінь рідини високого тиску перпендикулярно впливає на поверхню, що потребує очищення (рис. 9). Як було встановлено, швидкість руху довільної точки  $A_0$ , що знаходиться на фронті видалення забруднення, буде зменшуватися зі збільшенням радіуса очищеної поверхні.

Якщо залежність зміни радіуса очищення з плином часу відома, то зміну швидкості руху точки  $A$  можна представити як  $dR(t)/dt = v(t)$ . Зрозуміло, що отриману функцію швидкості можна пов'язати також і зі зміною радіуса, що дасть змогу встановити зв'язок руху точки  $A_i$  на фронті очищення з рухом подачі  $v_n$ . Вважаємо, що точка  $A$  рухається у тому ж напрямі, що і поступове переміщення поверхні відносно центра струменя. Швидкість точки відносно рухомої

системи координат  $O_1X$  визначається як  $v_a = v(R) - v_n$ . (У цьому випадку  $v_n$  – швидкість переміщення рухомої системи координат  $O_1X$  відносно нерухомої  $OX$ ). Однак за умови сталості процесу маємо, що  $v_a = 0$ , що дозволяє записати рівняння  $v_n = v(R)$ . Останнє і дає змогу визначити той радіус очищеної поверхні  $R$ , що буде залишатися незмінним протягом певного часу, коли відносний рух струменевої головки буде здійснюватися з постійною швидкістю  $v_n$ .

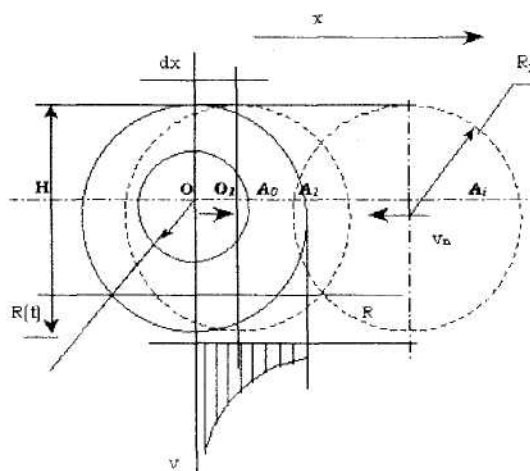


Рис. 9. До розрахунку ширини участка очищення поверхні

Таким чином, буде отримано смугу очищеної поверхні шириною  $H = 2R_y$ , де  $R_y$  визначено з швидкості подачі  $v_n$ . Якщо потрібно здійснити обробку поверхні площею  $S$ , то необхідний час становитиме:

$$t = \frac{S}{2R(v_n)v_n} \tag{23}$$

звичайно за умов певного тиску технологічної рідини, її витрати, властивостей забруднення та його товщини на поверхні. Формула (23) дає змогу виконати мінімізацію часу, якщо за змінний прийняти параметр подачі  $v_n$ .

Виконані авторами дослідження по очищенню поверхні від консистентних забруднень дозволили постулювати досить просту емпіричну залежність, що пов'язує між собою зміну радіуса очищеної поверхні у функції часу [мм/с] та узагальнені властивості забруднення, його товщину і режими ведення обробки:

$$R = f(t) = mp^n d^c h^k t^e, \tag{24}$$

де  $p$  – тиск рідини, МПа;  $d$  – діаметр отвору, мм;  $h$  – товщина забруднення, що вилучається, мм;  $t$  – плинний час, с;  $m$  – коефіцієнт, що враховує властивості забруднення та його зчеплення з поверхнею;  $n, c, k, e$  – емпіричні коефіцієнти (табл. 1).

Таблиця 1

Коефіцієнти до розрахунку  $R(t)$

Тип забруднення поверхні	m	n	c	k	e
1. Густа олива	17–20	0.6	1.7	-0.45	0.27
2. Солідол	15–16	0.5	1.5	-0.4	0.27
3. Графітне покриття	12–14	0.45	1.3	-0.4	0.27
4. Консерваційне покриття	8–10	0.45	1.3	-0.4	0.3
5. Парафіно-газова суміш	2–3	0.35	1.1	-0.4	0.3

### Практична реалізація гідроструменевих технологій очищення поверхонь

Створенням обладнання для гідроструменевого очищення поверхонь від забруднень теперішнім часом в Україні займається багато фірм, однак однією з провідних можна вважати фірму “ІНДРІС” (м. Київ), котра охоплює близько 80 % ринку такого обладнання в країні. Фірмою виготовляються блоки живлення високого тиску (рис. 10), що являють собою плунжерні помпи, з’єднані з електродвигуном або з дизельним двигуном; залежно від обставин вони можуть додатково комплектуватися підпорними помпами з системою фільтрації робочої рідини.

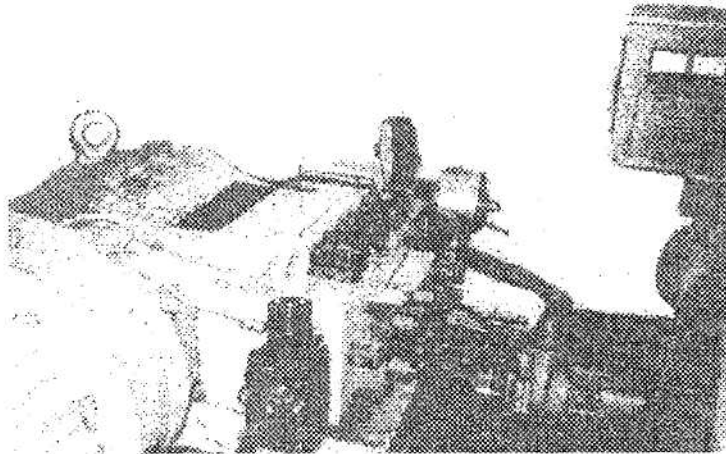


Рис. 10. Стационарний агрегат живлення високого тиску  
( $p = 120$  МПа, витрата  $50$   $\text{дм}^3/\text{хв}$ )

Очищення поверхонь може здійснюватися з допомогою струменевих пістолетів (рис. 11,а), які оснащені роторними головками (рис. 11,б).

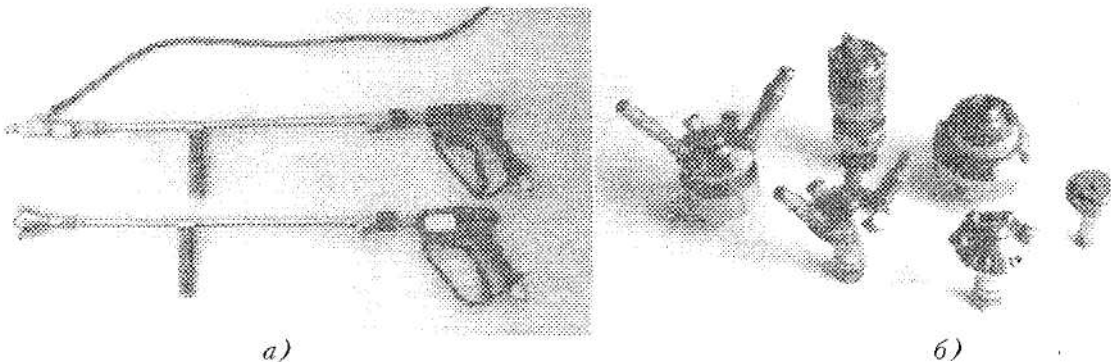


Рис. 11. Водоструменеві пістолети (а) та роторні головки (б) фірми "ІНДРІС"

Це дає змогу виконувати різні операції з очищення суден, літаків, рухомого складу залізничного транспорту, сільськогосподарської техніки, нафтоналивних резервуарів, танкерів; видаляти ізоляцію магістральних нафто- та газопроводів; очищувати фасади будівель.

### Висновки

В результаті виконаних теоретичних та експериментальних досліджень авторами встановлено, що гідроструменеві технології є високоефективними, енергозберігаючими і продуктивними методами видалення забруднень і покриттів з поверхонь твердого тіла довільної форми.

Детальний аналіз механіки взаємодії струменя з шаром забруднення дозволив створити математичний опис процесів, що відбуваються при струменевому очищенні. Проведені у подальшому експериментальні дослідження видалення консистентних покриттів підтвердили правильність висунутих гіпотез та дозволили отримати емпіричну залежність для інженерних методів розрахунку режимів ведення обробки. Одночасно встановлено, що опис видалення з поверхні твердих шарів є схематизованим і потребує подальшого уточнення і доопрацювання.

Запропоновані положення можуть бути використані у діючому виробництві.

## ЛІТЕРАТУРА:

1. *Зайченко И.З.* Применение высоконапорной струи жидкости для резания материалов // Станки и инструмент. – 1988. – № 4. – С. 25–28.
2. *Хашиш М., Эчерт Д.* Применение струйно-абразивной обработки для разрезки и очистки поверхности компонентов ядерных установок // Современное машиностроение, с.В. – 1990. – № 5. – С. 93–102.
3. *Петко И.В., Кедровский Б.Г.* Моделирование процесса резания неметаллических материалов гидроструей высокого давления // Изв. ВУЗов «Технология легкой промышленности». – 1987. – № 4. – С. 127–131.
4. *Повх И.Л.* Техническая гидромеханика. – Л.: Машиностроение, 1976. – 500 с.
5. *Саленко О.Ф., Струтинський В.Б.* Техніка та технологія гідроструменевої обробки: Монографія. – Київ: ВПЮЛ, 1998. – 252 с.
6. *Саленко О.Ф., Гергель А.П.* Видалення багаточарових покриттів гідроструменевими методами // Проблеми створення нових машин і технологій: Сб. научн. трудов КПІ. – Кременчук, 1998. – С. 207–211.
7. *Худобин Л.В., Жданов В.Ф., Кузнецов А.В.* Упрочнение поверхностей деталей импульсными струями жидкости // Вестник машиностроения. – 1992. – № 4, – С. 38–45.

БОНДАРЕНКО Микола Йосипович – асистент кафедри електромеханічних систем Київського національного університету технологій та дизайну.

Наукові інтереси:

- гідравлічні та пневматичні машини;
- обладнання легкої промисловості та побутового обслуговування.

ПЕТКО Ігор Валентинович – доктор технічних наук, професор кафедри електромеханічних систем Київського національного університету технологій та дизайну.

Наукові інтереси:

- технологія машинобудування;
- металорізальні верстати та системи.

ПРИХОДЬКО Володимир Іванович – директор АТ “Кременчуцький вагонобудівний завод”, м. Кременчук Полтавської обл.

Наукові інтереси:

- металорізальні верстати та системи;
- технологія машинобудування.

САЛЕНКО Олександр Федорович – кандидат технічних наук, доцент Кременчуцького державного політехнічного університету, м. Кременчук Полтавської обл.

Наукові інтереси:

- металорізальні верстати та системи;
- обробка матеріалів за спеціальними технологіями (гідро- та гідроабразивна обробка).

Подано 17.05.2001