

УДК 621.924.093.048

### ПІДВИЩЕННЯ КОМПАКТНОСТІ ГІДРОАБРАЗИВНОГО СТРУМЕНЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ НА СТРУМИННИХ ЕЛЕМЕНТАХ

**М. С. Хорольська**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: mariannamax@yandex.ru

Розглянуті питання якості і надійності гідроабразивної обробки на основі підвищення компактності різального струменя. З урахуванням динаміки течії двофазного потоку визначені особливості процесів зношування внутрішнього каналу струминних елементів, зокрема калібрувальної трубки. Наведені моделі зношування струминних елементів і рівняння для оцінки безвідмовності процесу гідрорізання. Побудована розрахункова модель течії двофазного струменя у внутрішньому каналі калібрувальної трубки. У результаті моделювання побудовано гістограму розподілу частоти потрапляння частинок на поверхню калібрувальної трубки в радіальному або вісьовому напрямках. З наведених результатів визначені зони максимального зношування трубки. Досліджені гранично зношені калібрувальні трубки вітчизняного та іноземного виробництва та побудовані профілі їх зношування. Показано, що результати моделювання та реальні профілі зношування задовільно узгоджуються. Запропоновано для підвищення надійності та стабільності процесу гідрорізання використовувати функціональні покриття, нанесені на поверхню каналу калібрувальної трубки та доведено їх ефективність.

**Ключові слова:** гідроабразивна обробка, різальний струмінь, функціональні покриття, струменеформуючі елементи.

### ПОВЫШЕНИЕ КОМПАКТНОСТИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТРУЙНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

**М. С. Хорольская**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: mariannamax@yandex.ru

Рассмотрены вопросы качества и надежности гидроабразивной обработки на основе повышения компактности резательной струи. С учетом динамики течения двухфазного потока определенные особенности процессов изнашивания внутреннего канала струйных элементов, в частности калибрующей трубки. Приведенные модели изнашивания струйных элементов и уравнения для оценки безотказности процесса гидрорезания. Построенная расчетная модель течения двухфазной струи во внутреннем канале калибровочной трубки. В результате моделирования построена гистограмма распределения частоты попадания частиц на поверхность калибрующей трубки в радиальном или осевом направлениях. По приведенным результатам определены зоны максимального изнашивания трубки. Исследованы предельно изношенные калибрующие трубки отечественного и иностранного производства, и построены профили их изнашивания. Показано, что результаты моделирования и реальные профили изнашивания удовлетворительно согласуются. Предложено для повышения надежности и стабильности процесса гидрорезания использовать функциональные покрытия, нанесенные на поверхность канала калибровочной трубки и доказана их эффективность.

**Ключевые слова:** гидроабразивная обработка, режущая струя, функциональные покрытия, струеформирующие элементы.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Гідроабразивна обробка є сучасним високопродуктивним процесом ударно-динамічного впливу на оброблювану заготовку, внаслідок чого на її поверхні відбуваються явища абразивного зношування, знеміцнення та мікрорізання з утворенням вирви руйнування.

Різальний інструмент – тонкий струмінь рідини, насичений абразивними частинками – формується гідрорізальною голівкою, внаслідок чого струмінь набуває певної геометричної форми та запасу кінетичної енергії. Конструктивні особливості струминної голівки (взаєморозташування деталей, характер їх з'єднання і герметизація, розміри камер та прохідних отворів), впливаючи на гідродинамічні характеристики і компактність формованого струменя, визначають якість і надійність процесу різання в цілому. Так, більшість функціональних відмов при реалізації гідроабразивного різання виникає саме внаслідок раптових змін геометрії струменеформуючих елементів – сопла та калібрувальної трубки, тобто їх раптових пошкоджень. Поступові відмови – збільшення прохідних отворів, зміна форми каналу, призводить до

параметричної відмови, тобто до виникнення більш широких різів, неповного прорізання листа, розпучення неоднорідної заготовки тощо.

Незважаючи на значні напрацювання у галузі забезпечення надійності функціонування складних технічних систем, питання подальшого підвищення надійності та працездатності гідроабразивного обладнання залишаються наразі актуальними та нагальними.

Основні прийоми забезпечення надійності складних технічних систем найбільш повно розкриті в роботах Н. Пронікова, О.Ф. Саленка, А. Харченка та ін. Надійність та стабільність роботи гідрорізальних верстатів досліджено в роботах О.В. Антоненка, В.О. Дудюка, О.В. Фомовської.

Отримані дані свідчать, що найбільш проблемними з точки зору надійності є такі елементи гідрорізальної системи, як калібрувальна трубка, сопло, засоби подачі абразиву. Період стійкості калібрувальної трубки 20–30 год., а інколи навіть менше 1 год., сопла – 10–40 год., а раптові відмови, пов'язані з припиненням подачі абразиву, йдуть з періодичні-

стю один раз на 10–15 год. Саме тому питання підвищення стійкості та надійності струменеформуєчих елементів набувають особливої актуальності, а пошук нових напрямків удосконалення струминних засобів відкриває перспективи зниженні собівартості та підвищення якості обробки.

Сучасні тенденції пошуку методу підвищення стійкості соплових пристроїв направлені, у першу чергу, на вдосконалення конструкції самих пристроїв [1–3] або використання нових, надтвердих і зносостійких матеріалів, таких як карбід бору, карбід вольфраму, карбід кремнію. Дані матеріали дозволяють дещо підвищити експлуатаційні характеристики трубки, одночасно призводячи до її істотного здорожчання [4, 5]. Поряд із тим, в багатьох роботах, зокрема [6–10], показано, що для випадків роботи елементів в умовах високих динамічних навантажень, при підвищених температурах та в умовах абразивно-адгезійного зношування ефективними є методи підвищення працездатності із використанням спеціальних покриттів, наприклад: детонаційних [6], газотермічних [7], вакуум-плазмових [8], отриманих електроконтактним приварюванням [9], електроіскровим легуванням [10] та ін. Зважаючи на те, що внутрішня поверхня калібрувальної трубки сприймає саме такий високоінтенсивний вплив від дії двофазного потоку рідини, можна припустити, що зменшення інтенсивності зношування та підвищення надійності процесу гідрорізання можливе саме із використанням спеціальних покриттів, а відмінність роботи певних ділянок калібрувальної трубки вимагає детального вивчення особливостей взаємодії швидкоплинного потоку при його формуванні із каналом калібрувальної трубки. Оскільки така відмінність обумовлює відповідну функціональність ділянок трубки, закономірною є спроба використати функціональний підхід для вирішення даної задачі.

Мета роботи – виявлення раціональних типів покриттів каналу калібрувальної трубки, які забезпечують більш стабільне зношування каналу з урахуванням кінематики двофазного потоку та призводять до підвищення надійності процесу гідроабразивного різання.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** При русі двофазного потоку «рідина–тверді частинки» по калібрувальній трубці відбувається хаотична дія на стінки трубки окремих абразивних часток під різними кутами атаки і з різною силою удару.

Разом із тим, у роботі [11] показано, що струмінь рідини контактує з внутрішньою поверхнею елементів струменеформуєчої системи тільки власною периферією, відтоді потрапляння частинок на поверхню визначається параболоїдом, який у першому наближенні уявимо нахиленим циліндром, кут нахилу якого відповідатиме куту стікання відпрацьованої рідини (9–14)°. Натікання частинок абразиву на поверхню відбуватиметься під різними кутами, однак за свідченнями роботи ці кути можна вважати приблизно однаковими і такими, що дорівнюють куту стікання. Таке припущення можливе лише у першому наближенні, оскільки на самих заготовках спостерігається суттєва відмінність кутів руху абразивних час-

тинок. У той же час такі кути є малими.

Характерним для кавітаційного і абразивного руйнування є залежність швидкості руйнування від плинного часу. Процес руйнування соплових пристроїв можна розділити на чотири етапи: пластична деформація без руйнування, початок руйнування поверхневого шару, максимальне руйнування з відокремленням дрібних часток, падіння швидкості руйнування та збільшення впливу гідродинамічних процесів. Подальше вивчення процесу дозволило встановити, що більш тверді матеріали частіше піддаються кавітаційному руйнуванню, ніж пластичні та пружні, що пояснюється релаксаційними властивостями матеріалів.

Глибина впровадження частки й її тангенціальне зміщення при впровадженні пов'язані з механічними властивостями абразиву і матеріалу зношуваної поверхні, розмірами часток, деформацією металу.

При малих кутах атаки, внаслідок переважання тангенціальної компоненти швидкості удару, основним процесом руйнування поверхневого шару є тангенціальне зміщення мікрооб'ємів металу у напрямі впровадження, тобто мікрорізання. Розподіл частинок абразиву за перетином струменя нерівномірний.

Дія абразивних часток на внутрішню поверхню каналу сопла і калібрувальної трубки викликає інтенсивне зношування останніх. У роботі [12] автори зазначають кілька осьових і поперечних моделей зношування перерізу калібрувальної трубки. Зношування поперечного перерізу може бути однорідним регулярним або нерегулярним. Нерівномірність у поперечному перерізі пов'язана з трьома чинниками: ексцентриситет, кутове зміщення і нерівномірність розподілу абразивних частинок за перетином. Ексцентриситет призводить до послідовного зносу згори вниз. Кутове зміщення призводить до випадкових радіальних зношувань. Проте найбільш важливим чинником впливу є перекоши трубки відносно сопла, що впливає на зношування каналу. Рівномірно кругла модель зношування спостерігається у випадку максимально компактного струменя, стікаючого співвісно до калібрувальної трубки.

Осьові моделі зношування можуть бути поділені на зношування розходженням, зношування сходженням, хвилясте зношування і зношування прориванням. Нижче наводиться короткий опис цих моделей.

1. Розходжуюче зношування відбуватиметься, якщо матеріал абразиву значно міцніший, ніж матеріал трубки, наприклад, якщо матеріал трубки – карбід кремнію, карбід вольфраму, кераміка або Roctec ®. Після певного періоду часу, форма поперечного перерізу почне нагадувати форму розширеного струменя.

2. При зношуванні, що сходиться, зношування сопла та калібрувальної трубки відбувається швидше у верхній частині, ніж у нижній. Такий вид зношування характерний для випадку, коли межа міцності матеріалу струменеформуєчих елементів менша за межу міцності абразиву. Даний вид зношування найчастіше спостерігається при використанні в якості абразиву граната (чи менш твердого

абразиву) з соплами з карбиду вольфраму і Roctec®.

3. Хвилясте зношування. Вперше було виявлено при рентгеновському дослідженні калібрувальних трубок. Таке зношення більш виражене, коли відношення відстані між зрізом калібрувальної трубки і оброблюваною поверхнею до діаметру калібрувальної трубки є відносно малою. Це може бути пов'язано із сильними коливаннями струменя (резонансного характеру), в результаті бічних ударів при виникненні сходинок різання, що з'являються і зникають. Дана модель недостатньо досліджена.

4. Зношування прориванням. Іноді спостерігається, що калібрувальна руйнується в результаті проривання. Це, в основному, пояснюється або значним порушенням геометрії, або дефектами матеріалу трубки.

Явища інтенсивного зношування елементів струменеформуючого пристрою і дозатора абразивних часток призводять до зміни форми, розмірів і стану (у тому числі мікрогеометричного) поверхневих шарів, що призводить до зміни характеристик самого струменя: змінюється товщина витісненого шару, міняється компактність струменя, його енергетика, визначувана у тому числі і коефіцієнтом витрати; в деяких випадках може істотно зменшитися довжина ядра (різальної частини). Саме тому знос сопла і калібрувальної трубки, нерівномірність подачі абразивних зерен, обумовлена їх залипанням або затормозом на шляху, і викликають різні параметричні відмови, пов'язані з отриманні браку і зменшенням очікуваної продуктивності процесу.

У роботі [13] авторами запропонована модель вірогідності безвідмовної роботи:

$$P(t) = P_{n_1}(t) \cdot P_{e_1}(t) \cdot P_{e_2}(t) \cdot P_{n_3}(t) \cdot P_{e_3}(t), \quad (1)$$

де змінні величини є вірогідністю безвідмовної роботи, відповідно:  $P_{n_1}(t)$  — при поступовому зношуванні калібрувальної трубки;  $P_{e_1}(t)$  — при раптових відмовах, пов'язаних зі зломом калібрувальної трубки;  $P_{e_2}(t)$  — при раптових відмовах, пов'язаних з порушенням роботи камери (при заторах подачі абразиву) змішувача;  $P_{n_3}(t)$  — при поступовому зношуванні сопла;  $P_{e_3}(t)$  — при раптових відмовах, пов'язаних із сколюванням або забиванням отвору частинками бруду.

Однак, з урахуванням того, що прояв поступових відмов є наслідком протікання процесів зношування, а настання випадкових відмов, виходячи із фізичних закономірностей, підкоряється експоненціальному закону  $P_p(t) = e^{-\lambda t}$ , то у роботі [14] автор пропонує рівняння для оцінки безвідмовності процесу із урахуванням надійності подачі абразиву:

$$P(t) = \left[ 0,5 + \Phi \left( \frac{d_{c \max} - \bar{d}_c - \gamma_c t}{\sqrt{\sigma_{d_c}^2 + \sigma_{\gamma_c}^2 t^2}} \right) \right] \times \left\{ 1 - \left[ 0,5 - \Phi \left( \frac{D_{k \max} - \bar{D}_k - \gamma_{Dk} t}{\sqrt{\sigma_{Dk}^2 + \sigma_{\gamma_{Dk}}^2 t^2}} \right) \right] \left[ 1 - e^{-\lambda_{Dk} t} \right] \right\} e^{-\lambda_{d'} t} P^z(t) \quad (2)$$

де  $d_{c \max}$  — гранична величина діаметра сопла;  $d_c$  — середній діаметр сопла;  $\gamma_c$  — швидкість зносу сопла;  $t$  — час;  $\sigma_{d_c}$  — розсіювання початкових значень

діаметрів сопел;  $\sigma_{\gamma_c}$  — розсіювання параметру швидкості зносу сопла;  $D_{k \max}$  — гранична величина діаметра калібрувальної трубки;  $D_k$  — середній діаметр калібрувальної трубки;  $\gamma_{Dk}$  — швидкість зносу калібрувальної трубки;  $\sigma_{Dk}$  — розсіювання початкових значень діаметрів калібрувальних трубок;  $\sigma_{\gamma_{Dk}}$  — розсіювання параметру швидкості зносу калібрувальної трубки;  $\lambda_{Dk}$  — потік відмов калібрувальних трубок;  $\lambda_{d'}$  — потік відмов сопел.

Вивченню особливостей формування багатofазних потоків присвячено значну кількість робіт, зокрема, О.Є. Проволоцького, О.Ф. Саленка, З.А. Стоцько, Т. Стефанович, О.В. Фомовської та ін. Однак питання впливу рідинно-абразивного потоку на характер руйнування каналу калібрувальної трубки і досі недостатньо розкриті. З метою чіткого детермінування функціональних зон побудована розрахункова модель течії двофазного струменя у внутрішньому каналі калібрувальної трубки (рис. 1).

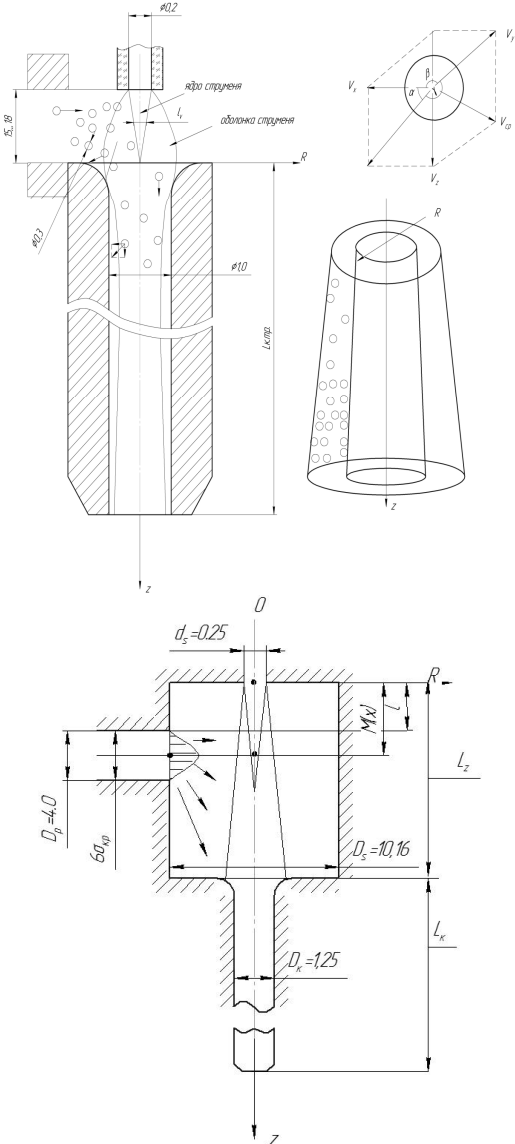


Рисунок 1 – Розрахункова модель течії двофазного струменя у внутрішньому каналі калібрувальної трубки:  $R_0=f(z)$ ,  $R_R=f(z)$ ,  $L_v$  – довжина кільця, куди може потрапити частинка

При цьому до уваги прийняті наступні припущення:

- 1) усі частинки, що попадають в камеру, потрапляють в змішувальну трубку;
- 2) рідинно-абразивний струмінь складається з оболонки (аерозольно-розірваного потоку) і ядра;
- 3) розміри ядра відповідають існуючим уявленням, а частинки можуть потрапити лише в оболонку; хвилевими процесами співударяння частинок і крапель води нехтуємо;
- 4) в залежності від точки потрапляння в оболонку, частинка набуває прискорення за тим чи іншим напрямком.

На основі рівняння Менделєєва-Клапейрона встановлено, що витрата абразивних частинок залежить від співвідношення обсягів жиклеру подачі стисненого повітря та власне змішувальної камери за умови ізотермічності процесу  $p_k = \frac{p_j W_j}{W_k}$ , де  $p_j$  – тиск у жиклері. У зв'язку з цим витрату рідинно-абразивної суміші у функції геометричних параметрів струменеформуючої системи гідрорізного верстата можна визначити:

$$Q_m = \frac{5}{2} \mu \pi d_c^2 \sqrt{\frac{2 p_j d_j^2 l_j \rho_a \rho_r}{[x_a \rho_r + \rho_a (100 - x_a)] d_k^2 l_k}}, \quad (3)$$

де  $d_c$ ,  $d_j$ ,  $d_k$  – діаметри вихідного отвору, отвору жиклеру та змішувальної камери відповідно;  $\mu$  – коефіцієнт витрати вихідного отвору;  $\rho_a$ ,  $\rho_r$  – густина абразивних частинок та рідини відповідно;  $l_j$ ,  $l_k$  – довжина жиклеру та змішувальної камери відповідно;  $x$  – масова концентрація абразиву у рідині, %. При цьому, прийнявши до уваги, що частинки вводяться до потоку на певному проміжку  $l=15\dots 18$  мм, та приймаючи до уваги, що в безпосередній близькості від зрізу сопла вони мають максимальний імпульс руху в радіальному напрямку, а при просуванні уздовж напрямку OZ вектор руху змінюється і наближається до напрямку самої осі z, рух частинок після зіткнення з окремими краплями рідинного потоку визначатиметься умовами потрапляння частинки у периферію потоку. Моделювання виконане в середовищі Flow Vision. При цьому оцінювали ймовірність того чи іншого напрямку руху частинки після її занурення в оболонку струменя, розкладаючи рух за осями OZ та Or.

Автор роботи [15] показав, що рівномірного розподілу частинок за перетином не відбувається. Опис розподілу потоку мас з більшою вірогідністю описується законом Гауса. Саме тому на першому етапі здійснювали вибірку координат центрів частинок за перетином каналу підведення, що відповідає закону Гауса з параметрами  $M$  та  $\sigma_{kp}$ . При цьому вважали, що  $6\sigma_{kp} = D_p = 4,0$  мм, а  $M$  визначає середину отвору каналу підведення.

В результаті моделювання з визначення напрямку руху абразивних частинок було побудовано гістограми розподілу частоти потрапляння частинок на поверхню калібрувальної трубки в радіальному

або осьовому (близькому до осьового) напрямках та розподілу кутів натікання уздовж каналу трубки (рис. 2). При цьому виходили з граничних меж напрямків руху частинок: в радіальному напрямку до кутів  $90^{0-15^0}$  та в осьовому –  $0^{0+25}$ . Такі межі обумовлені тим, що механізм руйнування поверхні трубки в них практично не змінюється, за твердженням [16] Адекватність отриманих результатів за критерієм Вейбулла 95 %.

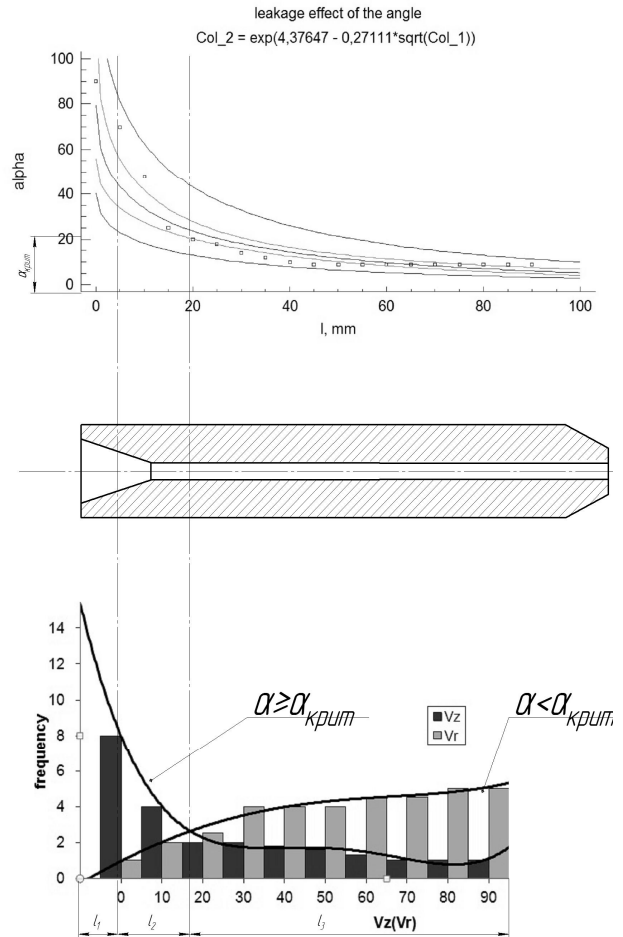


Рисунок 2 – Розподіл довжини каналу калібрувальної трубки на функціональні зони залежно від частот і напрямків руху абразивних частинок уздовж самої калібрувальної трубки

Побудова гістограм дозволяє виділити уздовж калібрувальної трубки три характерні зони:  $l_1$  – зона, в якій висока ймовірність наявності радіальних векторів руху прискорених частинок абразиву; в ній відбувається високоінтенсивне ударне навантаження стінок калібрувальної трубки частинками, що рухають під кутами, близькими до нормальних;  $l_2$  – зона в якій можна очікувати рух частинок під кутами близькими до  $45^0$ , тобто зона, в якій будуть максимально проявлятися як явища ударного руйнування, так і заносного;  $l_3$  – зона, в якій рухаються практично спрямлені частинки, в ній слід очікувати тільки ковзне руйнування – мікрорізання поверхні частинками.

З поданих результатів стає очевидним, що максимальне зношування трубки можливе у  $l_1$  та  $l_2$  зонах, а у третій – руйнування можливе лише у випад-

ку наявності окремих дефектів на поверхні твердого тіла. Для перевірки даного припущення експериментально досліджені гранично зношені калібрувальні трубки вітчизняного та іноземного виробництва та побудовані профілі їх зношування (рис. 3). З цією метою трубки були розрізані уздовж осі на електроерозійному верстаті. Результати моделювання та реальні профілі зношування задовільно узгоджуються.

Місце повного проривання трубки



Рисунок 3 – Гранично зношена калібрувальна трубка

Відомо, зношування каналу калібрувальної трубки  $\Delta T$  призводить до збільшення діаметру  $D_k$ , перевищення якого однозначно призводить до появи браку. При певній швидкості розвитку пошкодження  $\gamma_M$ , очікуваний час настання відмови дозволяє встановити вірогідний період стійкості трубки. Для серійних трубок цей час становить 10–12 год. Однак, окрім відмов поступових, обумовлених зношувальними явищами, у трубці виникають відмови раптові (рис. 4), які мають випадкову природу.

Використовувані сопла та калібрувальні трубки, виготовлені з квазікрихких матеріалів, можуть бути зруйновані в результаті виникнення критичних напружень. Це викликає появу мікротріщин, які стрімко розвиваються.

Відповідно до положень лінійної механіки руйнування, швидкість вивільнення енергії через береги тріщини визначається як  $G = \frac{1-v^2}{E} A(V)k^2$ , де  $k = \sigma\sqrt{\pi a}$  – коефіцієнт інтенсивності напружень, для даного класу матеріалів швидкість  $V$  зростання берегів тріщини обумовлена різницею  $(G - R)$ , де  $R$  – опір розтріскуванню, може сягати  $V=500...600$  м/с, тобто руйнування тіла розміром 3,5 мм відбудеться за час 3...5 мкс – практично миттєво. Таким чином, поступове зношування і крихке руйнування відбуваються як незалежні події, тоді безвідмовність становитиме:  $P_c(t) = P_n^c(t) \cdot P_p^c(t)$ .

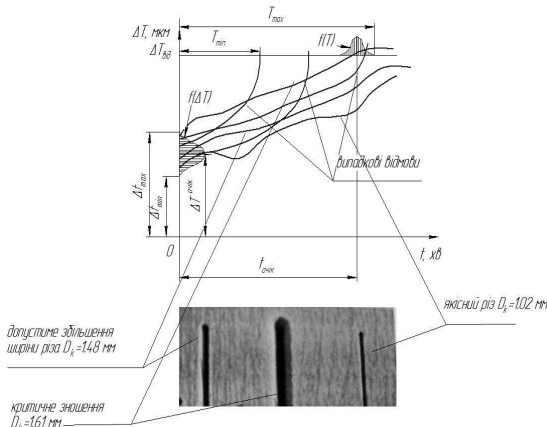


Рисунок 4 – Виникнення відмов струменеформуючої системи з урахуванням поступових і раптових відмов струменеформуючих елементів

Після встановлення величин початкових розсіювань параметрів та допустимих меж змін  $D_k$  та  $d_c$ , проведено моделювання безвідмовності процесу, в результаті чого було встановлено, що розподіл часу настання відмови як випадкової величини може бути апроксимований законом Гауса із математичним очікуванням часу виходу з ладу, встановленим за середніми параметрами струминної системи, наприклад, за умови першочергового виходу з ладу сопла  $T_{cm1} = \frac{d_c^{\max} - \bar{d}_c}{\gamma_c}$  хв, або законом Вейбула-

Гнеденко за умови, що час стійкості визначається як

$$T_{cm1} = \frac{d_c^{\max} - (\bar{d}_c + 3\sigma_d)}{\gamma_c + 3\sigma_\gamma} [17]$$

ності  $P=0,99$  безвідмовного протікання процесу час  $T_{cm1} = 5,6$  год, що інколи неприпустимо внаслідок значної тривалості обробки (наприклад, при виконанні складно профільного різання відповідальних виробів, обробки стільників та ін.).

На наш погляд, зменшення інтенсивності розвитку пошкодження та підвищення терміну стійкості трубки за рахунок виключення настання випадкових відмов можливе при використанні спеціальних зносостійких покриттів, що дозволяє значно підвищити термін стійкості матеріалів у агресивних середовищах, поліпшити стабільність процесу за рахунок менш інтенсивної динаміки зміни початкових геометричних параметрів каналу. Однак нині не існує чітких рекомендацій стосовно типу покриттів, що можуть бути використані в даній практиці, а також раціональних технологій нанесення таких покриттів на внутрішню поверхню каналу. Приймавши за основу технологію виготовлення калібрувальних трубок із двох симетричних складових, поєднаних між собою за допомогою бандажу, розглянули можливість використання певних типів покриттів на поверхні каналу.

З отриманих даних моделювання та результатів дослідних зразків калібрувальних трубок визначено, що на трубці можна виділити чіткі функціональні зони, в яких взаємодія потоку із внутрішнім каналом відбувається за відмінними схемами. Так, зона  $l_1$  (рис. 5), яка відповідає довжині зон  $l_1$  і  $l_2$ , сприймає високоінтенсивні ударні навантаження, які викликають абразивне, ерозійне та кавітаційне руйнування. Також значній дії ударних навантажень піддається торець трубки в результаті відбивання абразивних частинок та часток оброблюваного матеріалу від поверхні оброблюваної поверхні. Саме тому ці ділянки необхідно зміцнювати відповідними зносостійкими покриттями. У даний час для підвищення зносостійкості застосовують детонаційні, газотермічні та вакуум-плазмові покриття, які дозволяють підвищити стійкість у 2–9 разів [6]. Натомість на ділянці дія абразивних частинок викликає лише ковзне руйнування, тому тут доцільно використовувати покриття, що зменшують коефіцієнт тертя, наприклад TiN. Враховуючи те, що можливість виникнення проривання трубки в результаті її перекосу відносно сопла, виникає на вихідній частині трубки, що становить  $j$  від загальної довжини, то у

роботі пропонується зміцнювати лише ділянку  $l_2$  (рис. 5).

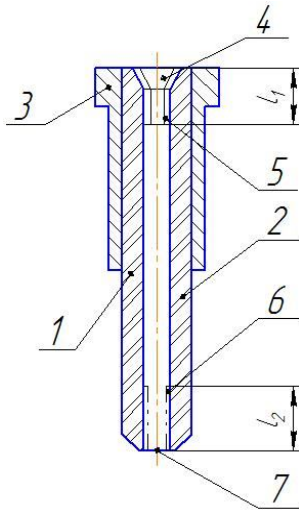


Рисунок 5 – Ескіз калібрувальної трубки з нанесеним фрагментарним покриттям: 1 та 2 – симетричні частини, 3 – обойма, 4 – канал для формування струминно-абразивного потоку, 5, 6 та 7 – функціональні покриття

Для підтвердження доцільності використання запропонованих технологій виготовлення трубки випробовували зразки розміром 40x10x5 мм зі сплаву ВК 8, який є інструментальним матеріалом елементів систем гідроабразивної обробки, як без покриття, так з вакуум-плазмовим покриттям TiN, з азотованим шаром і комбінованим покриттям з азотованого шару і N+TiN, а також із нанесеними електродуговим методом покриттями із порошкового дроту марок ФМІ2 та ПГС1 і без них.

Покриття наносилися на плоскі пластинки, які встановлювалися для досліджень під певними кутами до натікаючого струменя. Усі експериментальні дослідження проводилися при одних і тих же параметрах обробки, які були прийнятні наступними: тиск натікання – 280 МПа, об'ємна концентрація абразиву в суспензії – 0,6 кг/хв, час обробки – 10,5 хв.

Дослідження впливу кута атаки на зносостійкість зразків проводилися із використанням як абразиву суспензії гранатового піску із зернистістю 30 меш. Відстань між вихідним перерізом ежекційної насадки струминного апарату і зразком приймалося рівним 80 мм.

Під час досліджень виявлено наступну динаміку пошкоджень. Так, покриття TiN зношувалося більш динамічно і протягом 3 хв пошкодження досягло максимуму. Після цього швидкість пошкодження уповільнилася, і на зразках почали спостерігатися зони майже повного його вилучення. У подальшому розпочалося активне руйнування матеріалу підложки. Зразки з комбінованим покриттям були більш стійкими до рідинно – абразивного і кавітаційного зношування (майже в 3 рази). Зношування відбувалося рівномірно, без утворення областей відшарування.

Натомість зразки з покриттям ПГС 1 зношували-

ся більш інтенсивно і пошкодження досягло максимуму протягом 32 с. Варто зазначити, що дане покриття мало низьку адгезію до матеріалу основи. У процесі роботи спостерігалися зони значного відшарування. Покриття ФМІ 2 було більш стійкими до рідинно-абразивного і кавітаційного зношування (інтенсивне зношування спостерігалось після 41 с). Зношування відбувалося більш рівномірно, без утворення областей відшарування [18].

Отже, порівняльні експериментальні випробування показали, що залежно від режимів технологічного процесу обробки, зразки з комбінованим покриттям N+TiN зношуються менш інтенсивно, ніж зразки без покриття і з покриттями ФМІ 2 і ПГС 1 при впливі гідроабразивного потоку.

Обране покриття було нанесене на поверхню каналу 10 калібрувальних трубок, які випробовували в струминній головці ЛСК-400-5. За результатами випробувань побудовано криву розвитку пошкодження, подану на рис. 6. На основі отриманих даних стає очевидним, що час стійкості  $T_{очік}$  калібрувальних трубок з покриттям перевищує час стійкості звичайних трубок  $T_{очік}$  в середньому в 1,8-2,2 рази і становить в середньому 17,2 год. Характерним є також усунення появи раптових відмов.

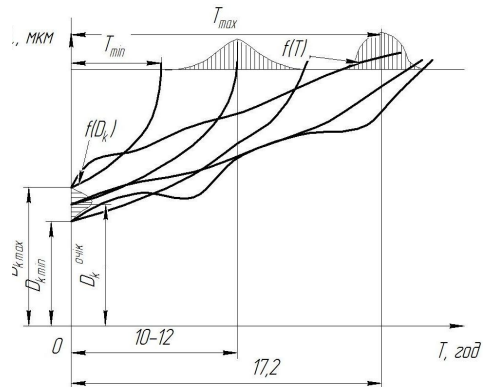


Рисунок 6 – Виникнення відмов струменеформуючих елементів гідрорізальних систем з функціональними покриттями

Таким чином, наукова новизна роботи полягає в тім, що вперше визначений чіткий поділ каналу калібрувальної трубки на функціональні зони, обрані покриття, що підвищують стійкість проти абразивного-ерозійного та кавітаційного зношування та запропонована принципово нова технологія виготовлення калібрувальних трубок з нанесеними фрагментарними покриттями.

**ВИСНОВКИ.** Отже, стійкість калібрувальної трубки може бути підвищена за рахунок нанесення захисних покриттів, які стабілізують зношування каналу, зменшуючи швидкість зношування, а також унеможливають розвиток локальних каверн з наступним повним пошкодженням трубки. Подібні трубки можуть бути отримані шляхом формування двох напівтрубок із наступним їх бандажуванням за допомогою металевих втулок, що також значно спрощує технологію виготовлення цього елемента.

Аналіз особливостей умов функціонування трубки при роботі гідроабразивної головки довів, що існують досить чітко виражені функціональні зони трубки – початкова ділянка ( $l_1 + l_2 \approx 20$  мм) та калібрувальна ділянка ( $l_3 = 50 \dots 100$  мм), на які вплив двофазного потоку суттєво відрізняється.

Використання покриттів N+TiN на довжині початкової ділянки  $l_1 \approx 20$  мм та покриття на калібрувальній частині довжиною  $l_2 \approx 20$  мм а також покриття N+TiN на торці трубки дозволяє підвищити час стійкості  $T_{\text{оик}}$  в середньому в 1,8–2,2 рази і довести його до 17,2 год. При цьому розсіювання часу стійкості зменшується до 0,78 год.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Патент РФ 2184620, МПК В05В1/02. Сопло для получения режущей струи жидкости / Степанов Ю.С.; Барсуков Г.В. – Опубл. 10.07.2002.
2. Патент РФ 2467865, МПК В24С5/04. Сопло для абразивоструйной обработки поверхностей / Н.И. Полушин, Е.Н. Сорокин, В.В. Журавлёв. – Опубл. 27.11.2012.
3. Патент РФ 2465064, МПК В05В1/02. Износостойкое сопло для формирования режущей абразивно-жидкостной струи / А.А. Барзов, А.А. Лыгина, А.Л. Галиновский и др. – Опубл. 27.10.2012
4. Андилахай А.А. Анализ струйно-абразивных методов обработки поверхностей // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": збірник наукових праць. Тематичний випуск «Технології в машинобудуванні». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 53. – С. 4–10.
5. D. Wright, J. Wolgamott, G. Zink. Waterjet nozzle material types WATERJET NOZZLE MATERIAL TYPES // WJTA American Waterjet Conference August 17–19, 2003, Houston, Texas, pp. 143–152.
6. Детонационные покрытия в машиностроении / С.С. Бартнев, Ю.П. Федько, А.И. Григоров. – Л.: Машиностроение, 1982. – 217 с.
7. Аморфные газотермические покрытия: теория и практика / Ю.С. Борисов, В.Н. Коржик // Автомат, сварка. – 1995. – № 4. – С. 3–12.
8. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / А.Н. Тушинский, А.В. Плохов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 200 с.
9. Влияние режимов электродуговой металлизации и состава применяемых порошковых проволок на структуру и абразивную износостойкость покрытий / В.И. Похмурский, М.М. Студент, И.А. Рябцев и др. // Автоматическая сварка. – 2006. – № 7. – С. 31–36.
10. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов, Н.Я. Парканский, В.М. Ревуцкий. – Кишинев: Штиинца, 1985. – 198 с.
11. Саленко А.Ф., Струтинский В.Б., Загирняк М.В. Эффективное гидрозрезание: монография. – К.: ВИПОЛ, 2005. – 488 с.
12. Hashish, M., (1997) "Mixing Tube Material Effects and Wear Patterns," Proceedings of the 9th American Water Jet Conference, Dearborn, MI, August, pp. 211–222.
13. Надежность процесса гидроабразивного резания / О.Ф. Саленко, В.А. Дудюк // Международный информационно-технический журнал «Оборудование и инструмент для профессионалов». – Харьков, 2010. – № 6. – С. 22–23.
14. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. – К.: Техника, 1989. – 177 с.
15. Фомовська О.В. Візуалізація формоутворення при гідроабразивному різанні на основі енергетичних моделей руйнування // Вісник КДУ ім. М. Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 2, част. 1. – С. 27–31.
16. Hashish, M., (1997) "Prefection of Deps of Cut in Abrasive-Water jet Mashining", Proceedings of the symposium on Modeling of Materials proceeing, ASME MD, vol. 3, pp. 65–82.
17. Дудюк В.О. Забезпечення надійності процесу гідроабразивного різання на основі ідентифікованих моделей власних і параметричних відмов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – 23 с.
18. Moisejenko M.S., Salenko O.F., Kumurgy O.U., Ljashenko B.A., Rutkovsky A.V. (2012) «Application of wear-resistant coatings for increasing efficiency of elements of hydrocutting devices» // Journal of Mechanical Engineering National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», no. 65. , pp. 19–25.

#### INCREASE OF COMPACTNESS OF HYDROABRASIVE JET WHILE USING FUNCTIONAL COATINGS ON JET ELEMENTS

**M. Khorolska**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: mariannamax@yandex.ru

In the paper, the author has discussed issues of quality and reliability of the waterjet process by improving the compactness of the cutting jet. Given the dynamics of two-phase flow, certain features of the wear processes of the internal channel of jet elements, in particular, the calibrating tube. The models of jet elements' wear-out and equations to estimate the reliability of waterjet cutting are presented. Also, the author has built a computer model of two-phase jet flow in the inner channel of the calibration tube. As a simulation result, it was obtained the histogram of frequency distribution of particles hitting the surface of the calibrating pipe radially or axially. The research results allow identifying maximum wear-out areas of the tube. Thus, the calibrating tubes ultimately worn, and being produced domestically or

abroad, were studied, and their wear-out profiles were constructed. It is shown that simulation results and real wear-out profiles are corresponded adequately. To improve reliability and stability of the waterjet cutting process the author has proposed the surfaces of channel tube and gauge to be covered with functional coatings, which has proved its effectiveness.

**Key words:** waterjet cutting, functional coverage, jet formation items.

## REFERENCES

1. Stepanov, U. and Barsukov G. (2002), Patent RU 2184620, B05B1/02. Nozzle for obtaining cutting current fluid.
2. Polushin, N. and Sorokin, E. (2012). Patent 2467865, B24C5/04. Nozzle for waterjet processing surfaces.
3. Barzov, A., Lygina A., Galinovsky, A., Shashurin, V., Sysoev, N., Abashyn, M. and Zavalyn, M. (2012), Patent RU 2465064, B05B1/02. Wear-resistant nozzle for forming a cutting abrasive liquid jet.
4. Andylakhay, A. (2010), "Analysis of jet-abrasive surface treatment methods", *Journal of National technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Series: Engineering Technologies*, no. 53, pp. 4–10.
5. D. Wright, J. Wolgamott and G. Zink. (2003), "Waterjet nozzle material types", *WJTA American Waterjet Conference*, August 17-19, 2003, Houston, Texas, pp. 143–152.
6. Bartenev, S., Fedko, U. and Grygorov, A. (1982), *Detonatsionnyie pokryitiya v mashinostroenii* [Detonation coatings in engineering], Mashinostroenie, Leningrad.
7. Borisov, U. and Korzhyk, N. (1995), "Amorphous thermal spray coatings: theory and practice", *Avtomaticheskaya svarka*, no.4, pp. 3–12.
8. Tushinsky, A. and Plohov, A. (1986), *Issledovanie strukturyi i fiziko-mehaniicheskikh svoystv pokryitiy*, [Investigation of the structure and physico-mechanical properties of the coatings], Nauka, Novosybsk.
9. Pohmursky, V., Student, M. and Ryabtzev, I. (2006), "Effect of arc spraying and composition of cored wires used on structure and abrasive wear resistance of coatings", *Avtomaticheskaya svarka*, no. 7, pp. 31–36.
10. Petrov, U. (1985), *Elektroiskrovoe legirovanie metallicheskikh poverhnostey*, [Electric-doping metal surfaces], Shiintza, Kishinev.
11. Salenko, O., Strutinskiy, V. and Zagirnyak, M. (2005), *Efektivne gidrorizannya: monographiya* [Effective waterjet cutting: monograph], Vipol, Kiev, Ukraine.
12. Hashish, M., (1997), "Mixing Tube Material Effects and Wear Patterns," *Proceedings of the 9th American Water Jet Conference, Dearborn, MI*, August, pp. 211–222.
13. Salenko, A. and Dudyuk, V. (2010), "Waterjet cutting process reliability", *Oborudovanie i instrument dlya professionalov*, no. 6, pp. 22–23.
14. Provolotskiy, A.E. (1989), *Struyno-abrazivnaya obrabotka detaley mashin* [Jet-abrasive processing of machine parts], Technologiya, Kiev.
15. Fomovska, O. (2009), "Visualizing of forming during waterjet cutting based on power models destruction", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, no. 2, part 1, pp. 27–31.
16. Hashish, M., (1997), "Prefection of Deps of Cut in Abrasive-Water jet Mashining", *Proceedings of the simposium on Modeling of Materials proceesing, ASME MD*, vol.3, pp. 65–82.
17. Dudyuk, V. (2011), "Securing waterjet cutting process based on identified models and their parametric failures", Thesis abstract for Cand. Sc. (Engineering.), SevNTU, Sevastopol, Ukraine.
18. Moisejenko, M.S., Salenko, O.F., Kumurgy, O.U., Ljashenko, B.A., Rutkovsky, A.V. (2012), «Application of wear-resistant coatings for increasing efficiency of elements of hydrocutting devices», *Journal of Mechanical Engineering*, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», no. 65, pp. 19–25.

Стаття надійшла 30.10.2013.