

---

# Системи приводів. Технологія і обладнання машинобудівного виробництва. Мехатроніка

---

УДК 621.924.093.048

М.С. Моїсеєнко,  
О.Ф. Саленко, д-р техн. наук  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,  
О.Ю. Кумуржи,  
Б.А. Ляшенко, д-р техн. наук,  
А.В. Рутковський, канд. техн. наук  
Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, м. Київ

## ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ГІДРОРІЗАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ЗА ДОПОМОГОЮ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ

*Розглянуто питання дослідження стійкості покриттів TiN, азотованого шару та комбінованого покриття з азотованого шару та TiN в умовах високоінтенсивного кавітаційно-гідроабразивного зношування. Отримано регресійні рівняння стійкості покриттів, нанесених на основу з твердого сплаву типу ВК 8 від умов натікання рідини. Показано можливості використання функціонально-орієнтованого підходу до формування поверхневого шару протокових частин елементів гідrorізальних пристроїв, доведено підвищення їх працеспроможності.*

*In this work the question of investigating the stability of coatings TiN, the nitrated layer and the combined coverage of the nitrated layer and TiN under conditions of high hydro-cavitation wear are considered. Received regression equation resistance of coatings deposited on the basis of hard alloy VK 8 type of conditions of leakage of a fluid. The possibilities of functionally-oriented approach to the formation of the surface layer parts protokovyh elements of hydrocutting devices are shown, increasing of their worktime is proved.*

### Вступ

Поява і широке використання в промисловості нових конструкційних матеріалів, насамперед композитів, і нових високотехнологічних виробів, зумовлює потребу в нових методах обробки. Одним із таких методів є гідроабразивне різання.

Застосування гідроабразивного різання виправдовує себе особливо там, де використання традиційних методів не дає задовільної якості. Витрати на доробку або зниження виробничого темпу йдуть у небуття. Додатковою перевагою цього методу є його чистота й екологічність. Сучасні системи гідроабразивного різання забезпечують безперервну оптимізацію виробничого процесу та підвищення якості в обробній промисловості. Необхідність отримання високоточних результатів обробки потребує умов сталості і компактності струминно-абразивного потоку.

Використання гідроабразивної обробки дає можливість значно поліпшити якість оброблюваної поверхні і продуктивність різання, яке викликає необхідність у розробці нових перспективних компонувань верстатів для забезпечення комбінованої обробки.

Серед тенденцій розвитку гідроабразивної обробки виділяють підвищення точності обробки та ефективності устаткування. Ефективність може бути підвищено за ра-

хунок підвищення тиску рідини (до 600 МПа) та кількості одночасно працюючих головок [1, 2]. Однак підвищення робочого тиску призводить до інтенсифікації зношування систем гідrorізального обладнання, зокрема калібрувальних трубок (рисунок 1), що, у свою чергу, позначається на вартості обробки.

### Постановка задач дослідження

Калібрувальна трубка — один з найбільш важливих елементів гідrorізальної системи, який впливає на технологічні та економічні характеристики різання. Виробничі спостереження свідчать, що більшість функціональних відмов при реалізації гідроабразивного різання виникає саме внаслідок раптових змін геометрії струменеформуючих елементів — сопла та калібрувальної трубки. Трубка піддається постійному зношуванню, внаслідок чого внутрішній діаметр поступово збільшується, що визначає знос трубки. Зазвичай стійкість трубки становить 10–15 годин, а її вартість сягає 20–50 \$ [2].

У зв'язку з цим актуальною є задача підвищення стійкості калібрувальних трубок із застосуванням функціонально-орієнтованого підходу.

Для визначення особливостей зношування калібрувальної трубки проаналізовано вплив руху абразивних зерен та вид руйнування.



Рисунок 1 — Калібрувальні трубки, змішувальна камера та сапфірове сопло фірми Synerjic Inc (постачальник — ELFIHmbH, Austria).

Відомо, що 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 [3].

Абразивне руйнування поверхні трубки залежить від характеру дії абразивних зерен на її поверхню. Залежно від напрямку дії абразивного струменя на поверхню розрізняють наступні схеми її дії: руйнування ударним струменем, коли кут атаки  $\alpha = 90^\circ$  (рисунок 2а); руйнування ковзаючим струменем, коли  $\alpha = 0$  (рисунок 2б); руйнування косим струменем, коли  $0 < \alpha < 90^\circ$  (рисунок 2в) [4; 5].

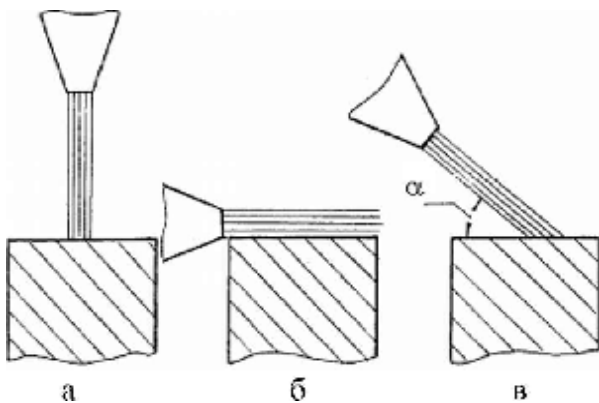


Рисунок 2 — Схеми дії абразивного струменя на поверхню.

Якщо на плоску поверхню матеріалу впливає потік твердих абразивних часток, що летять із швидкістю  $v_u$  під кутом  $\alpha$  до поверхні, то кожна частка, ударяючись, пружно деформує оброблювану поверхню і прослизає по ній з тертям [6].

Прийнято, що нормальна компонента швидкості  $v_n$  спричиняє тільки пружну деформацію матеріалу, а дотична  $v_t$ , яка вступає у фрикційний контакт з поверхню,

частково або повністю гаситься і виконує роботу різання. З наведеного виходить, що найбільша продуктивність обробки теоретично має бути при куті атаки  $\alpha = 45^\circ$ , що підтверджується багатьма авторами [6–9].

Інтенсивність зношування в абразивному потоці визначається як результат множинних ударів твердих часток об поверхню зношування при різних кутах атаки. Початковий період руйнування металу характеризується впровадженням абразивних часток у поверхневий шар на деяку глибину, другий — безвідривним переміщенням часток матеріалу уздовж поверхневого шару на деяку відстань, при якій відбуваються зміщення мікрооб'ємів металу в шарі в напрямі впровадження частки і відрив їх від масиву [10].

При зануренні абразивної частки у поверхневий шар металу за умов вільного удару відбувається деформація приконтатної зони, внаслідок чого у цьому шарі виникає складне неоднорідне напружено-деформоване поле із змінною межею. Напруження і деформації, що виникають при впровадженні абразивної частки у метал, залежать від комплексу чинників, які характеризують параметри потоку часток і опір металу деформаціям пружнопластичності.

У зоні контакту розвиватимуться пружні і пластичні деформації, що сприятимуть зім'яттю металу під часткою в радіальному напрямі і наступному тангенціальному зрушенню в напрямі руху цієї частки відносно поверхні.

Глибина впровадження частки та її тангенціальне зміщення при впровадженні пов'язані з механічними властивостями абразиву і матеріалу зношеної 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 в напрямі впровадження, тобто мікрорізання.

При кутах атаки, близьких до  $90^\circ$ , внаслідок переважання нормальної компоненти швидкості механізм руйнування поверхневого шару металу в потоці абразивних часток набуває полідеформаційний ударний характер.

Руйнування конструкційних матеріалів під дією абразивних часток, що містяться в потоці рідини, носить дуже складний характер і може бути в'язким, крихким, полідеформаційним або набувати втомного характеру і ускладнений явищем кавітації [10].

Таким чином, параметри внутрішнього профілю трубки повинні забезпечити наступні умови течії [3]:

- 1) мінімальну товщину пограничного шару потоку всередині трубки, турбулентного шару вихідного вільного струменя, що зменшує товщину, а також знижує взаємодію струменя з середовищем;
- 2) зменшення можливості відриву пограничного шару струменя, сприяючи зниженню збудження центральної течії;
- 3) зменшення можливості кавітації, що забезпечує виключення утворення низьких тисків усередині трубки, щоб уникнути утворення наступного об'єднання бульбашок і руйнування трубки.

На ефективність обробки впливає не лише кут зустрічі часток з поверхнею, але і фізико-механічні властивості матеріалу, з яким частка стикається.

Приведені в роботах [6, 7, 10] теоретичні залежності дозволяють оцінити вплив кута атаки на інтенсивність зношування лише якісно. Тому для аналізу явищ, які відбуваються у калібрувальній трубці під час формування рідинно-абразивного потоку, використовували програмний комплекс Flow Vision. При моделюванні ставилася задача виявлення обумовленості епіюру навантаження на поперечному зрізі калібрувальної трубки мікрогеометричними параметрами струминної ерозії, визначалась роль та активність хвильових процесів, що виникають у струмені і чинять дію на внутрішній діаметр калібрувальної трубки.

Ядром пакету є блок чисельного розв'язання рівняння руху рідини в ортогональній системі координат (рівняння Нав'є–Стокса (1)), яке для певних початкових і граничних умов, заданих користувачем, дозволяє отримати епіюри розподілу швидкостей і динамічних тисків у точці контакту струменя з тією чи іншою поверхнею:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\varphi^2}{r} = f_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial r} + \\ & + v \left( \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{v_r}{r^2} \right) \\ & \frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{v_r v_\varphi}{r} = f_\varphi - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \rho}{\partial \varphi} + \\ & + v \left( \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{v_\varphi}{r^2} \right); \\ & \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = f_z - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \\ & + v \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right). \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де  $f_r, f_\varphi, f_z$  — напруги масових сил уздовж відповідних осей  $r, \varphi, z$ ;  $v$  — кінематична в'язкість;

$\frac{\partial v_r}{\partial r}; \frac{\partial v_r}{\partial \varphi}; \frac{\partial v_r}{\partial z}; \frac{\partial v_\varphi}{\partial r}; \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi}; \frac{\partial v_\varphi}{\partial z}; \frac{\partial v_z}{\partial r}; \frac{\partial v_z}{\partial \varphi}; \frac{\partial v_z}{\partial z}$  — компоненти швидкостей деформування елементарного обсягу рідини (однорідні похідні описують швидкість деформації стиснення або розтягування лінійних елементів виділеного обсягу, а різномірні — швидкість зміни кутів між ними);  $\rho$  — масова густина рідини;  $v_r, v_\varphi, v_z$  — швидкості руху елементарного об'єму відносно відповідних координат.

Значення напружень масових сил уздовж відповідних осей за умови нерозривності  $\frac{\partial(v_r r)}{\partial r} + \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + r \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$  дозволяють визначити масову силу, що діє на об'єм рідини, що розглядається:

$$F = \int_W f \rho dW,$$

де  $W$  — елементарний об'єм.

Початкові умови визначаються геометричним профілем соплового насадку, тиском рідини  $p_0$ , її властивостями. Граничні умови обумовлюють натікання струменя на поверхню, якою є внутрішня циліндрична поверхня калібрувальної трубки.

Масоперенос розраховували по (2), виходячи з рівняння Стокса, яке визначає силу опору частинки у потоці,

$$F_c = \frac{18\mu\Delta w}{d_s^2}, \quad (2)$$

де  $\mu$  — коефіцієнт витрати рідини через сопло;  $d_s$  — діаметр трубки.

Для визначення параметрів системи було створено тривимірну модель області вільного струмення. За допомогою програмного пакету Flow Vision було визначено тиск і швидкість у струмені.

Для модельних досліджень було розглянуто задачу спливання струменя рідини, що витікає з отвору діаметром 1 мм. Задля визначення тиску та швидкості рідини у струмені було створено та вирішено задачу з вільною поверхнею.

Фізичні параметри:

- початкові параметри;
- опорні величини — температура 273° К, тиск 101000 Па;
- параметри моделі — густина рідини 1000 кг/м³;
- рідина 0 — чиста вода;
- адаптація сітки максимум до 2-го рівня.

Задано граничні умови для елементів: стінок, входу, виходу, а також ступінь адаптації для кожного із них. Швидкість струменя на вході 300 м/с.

Побудовано початкову сітку з 25652 комірок; з них 21168 розрахункових згущували сітку в зоні виходу із сопла та біля поверхні натікання.

Задано загальні параметри моделі та час протікання розрахунку в межах від 0 до  $5 \cdot 10^{-5}$  с; розрахунок стандартний.

Результати розрахунків наведено у вигляді епіюр (рисунки 1 а, б) заливка — тиск, у діапазоні від  $3,5 \cdot 10^5$  Па до  $7,579 \cdot 10^7$  Па; швидкість — ізолінії, від 0 до 300 м/с [11].

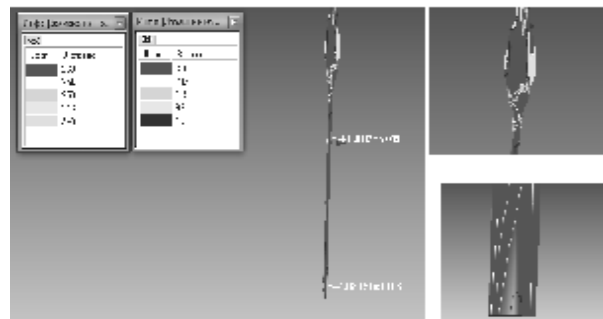


Рисунок 3 — Результати моделювання взаємодії рідинно-абразивної суміші зі стінками калібрувальної трубки.

Дослідження показали, що найбільш навантаженими, з точки зору абразивного зношування, є місця входу рідинно-абразивної суміші та на виході з трубки (рисунки 3). У

цих зонах поперечний тиск, спричинений хвилювими процесами, максимально впливає на рухомі частинки абразиву.

Подана мікрофотографія кромки сопла свідчить, що руйнування відбувалося саме на тій частині, яка сприймала максимальне гідродинамічне навантаження (рисунок 4), яке спричинила зворотня хвиля у момент спливання струменя на перепону — оброблювану поверхню.

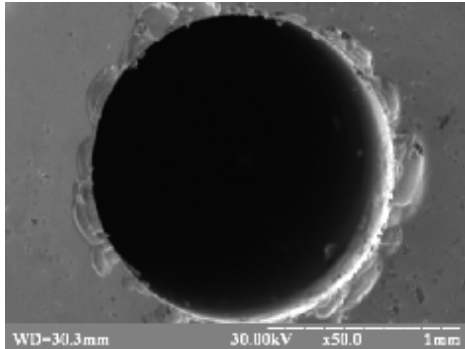


Рисунок 4 — Мікрофотографія зношеної кромки трубки.

Отже, картина пошкодження трубки відповідає змодельованим параметрам епюри тиску як за поздовжнім так і торцевим перерізами соплового каналу. З рисунку 5 на осцилограмі видно періодичне зростання тиску на кромці сопла з амплітудою від  $3,89 \cdot 10^8$  Па до  $7,579 \cdot 10^7$  Па і з частотою  $2 \cdot 10^{-6}$  с, що свідчать про наявність хвилювих процесів у самому тілі струменя.

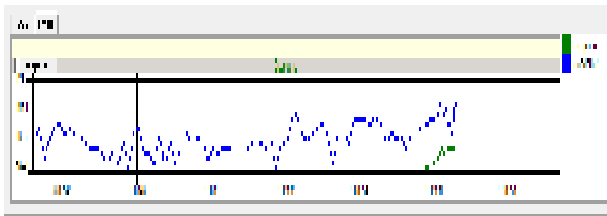


Рисунок 5 — Графіки зміни швидкості і тиску при натіканні струменя на стінки калібрувальної трубки.

Зносостійкість  $\sigma_w$  матеріалів калібрувальних трубок при гідроабразивному зношуванні є складною і неоднозначною функцією умов взаємодії матеріалу з абразивними частками і середовищем [4]

$$\sigma_w = f(T; P; d; K_m; K_\phi; v; \alpha; \chi),$$

де  $T$  — тривалість зношування;  $P$  — концентрація абразивних часток в рідині;  $d$  — розмір часток;  $K_m$  — коефіцієнт твердості, що дорівнює відношенню твердості матеріалу до твердості абразивних часток;  $K_\phi$  — коефіцієнт, що характеризує форму часток;  $v$  — швидкість абразивних часток у момент удару по поверхні деталі;  $\alpha$  — кут нахилу вектору швидкості частки до зношеної поверхні (кут атаки);  $\chi$  — коефіцієнт, що характеризує зниження механічних властивостей матеріалу в результаті знеміцнюючої фізико-хімічної дії середовища.

Загальний обсяг вилученого матеріалу при взаємодії гідроабразивного струменя зі стінками калібрувальної трубки становитиме:

$$w_{\Sigma} = w_1 + w_2 = \frac{\pi \delta_n^2 (3r - \delta_n)}{3} + \frac{\delta_n (6a + 18b)}{15} \delta_a,$$

глибина лунки  $\delta_n$  та її довжина  $\delta_a$  у функції параметрів процесу,

$$\delta_n = \frac{mv_n^2}{2} \frac{Ra}{k_n z_n HB},$$

$$\delta_a = \frac{mv_a^2}{2} \frac{z_n}{k_a \sigma_b Ra} - \frac{k_a T_p^2 \sigma_b Ra}{2mz_n}$$

де  $m$  — маса абразивних частинок;  $v_n, v_a$  — нормальна та тангенційна складові швидкості удару частки по поверхні, що обробляється;  $Ra, HB, \sigma_b$  — параметри шорсткості, твердості та міцності поверхні;  $z_n$  — зернистість абразивних часток;  $T_p$  — постійна, що враховує інерційність процесу мікрорізання;  $k_n, k_a$  — постійні коефіцієнти.

Оскільки калібрувальна трубка сприймає гідродинамічне та механічне навантаження від дії швидко рухомих частинок абразиву, які вводяться у потік рідини за зрізом сопла, причиною виходу її з ладу є зростання калібрувального отвору  $D_k$  понад встановлений граничний розмір та сколювання окремих елементів, через що змінюється геометрія сформованої канавки різу (рисунок 6). Це пошкодження обумовлене зношувальними явищами. Логічно постає задача підвищення стійкості калібрувальних трубок через нанесення захисних покриттів.

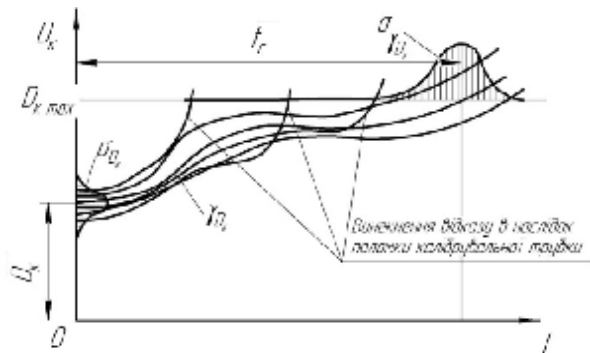


Рисунок 6 — Залежність зміни калібрувального отвору від часу спрацювання.

Використання спеціальних зносостійких покриттів дозволяє значно підвищити термін стійкості матеріалів у агресивних середовищах, поліпшити стабільність процесу за рахунок меншої динаміки зміни початкових геометричних параметрів каналу. Однак донині не існує чітких рекомендацій стосовно типу покриттів, які можуть бути використано на практиці, а також раціональних технологій нанесення їх на внутрішню поверхню каналу.

Для вирішення питання щодо доцільності використання певних поверхневих покриттів на гідроабразивну стійкість випробовувалися зразки розміром  $40 \times 10 \times 5$  мм з твердого сплаву ВК 8, який є інструментальним матеріалом елементів систем гідроабразивної обробки як без покриття, так і з вакуум-плазмовим покриттям TiN, з азотованим шаром і комбінованим покриттям з азотованого шару і TiN (рисунок 7). Режими нанесення покриттів наведено у таблиці 1.

З метою наступних мікроелектронних досліджень покриття наносилися з урахуванням функціонально-орієнтованого підходу на пласкі пластинки, які встановлювалися для досліджень під певними кутами до натікаючого струменя (рисунок 7).

Функціонально-орієнтований підхід припускає виготовлення калібрувальної трубки за спеціальною технологією, яка заснована на точній топологічно орієнтованій реалізації необхідної безлічі алгоритмів технологічної дії засобів обробки в необхідні мікро-, макрозони і ділянки виробу, які функціонально відповідають умовам їх експлуатації в кожній окремій його зоні.

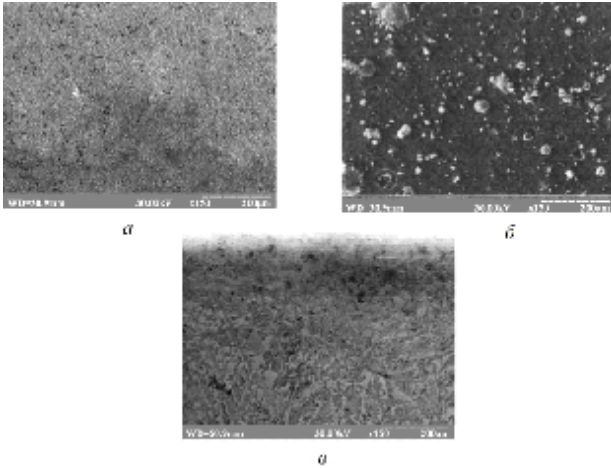


Рисунок 7 — Мікроелектронні дослідження сплаву ВК 8:  
а — без покриття; б — з покриттям TiN;  
в — з азотованим поверхневим шаром.

Для проведення порівняльного аналізу усі експериментальні дослідження вироблялися за одних і тих самих параметрах обробки: тиск — 280 МПа, об'ємна концентрація абразиву в суспензії — 0,6 кг/хв, час обробки — 10,5 хвилини.

Зважування зразків до і після обробки виконувалося на аналітичних вагах ВЛР-200 з точністю зважування до 0,0001 г.

Таблиця 1 — Режими нанесення покриттів

Параметри	Вакуум-плазмове напылення TiN	Іонно-плазмове термоциклічне азотування
Тиск робочий, Р	$2,2 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст.	100 Па
Струм дуги Iд, А	100	10
Температура Т, °С	520	550
Інтенсивність U, А	500	600
Час t, год	40	360

Дослідження впливу кута атаки на зносостійкість зразків проводилися з використанням як абразиву у су-

спензії гранатового піску із зернистістю 30 меш. Відстань між вихідним перерізом ежекційної насадки струминного апарата і зразком дорівнювало 80 мм.

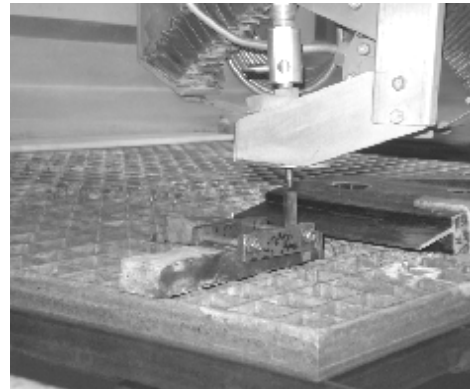


Рисунок 8 — Встановлення досліджуваного зразка на робочий стіл гідрорізної машини ЛСК-400-5.

На рисунку 9 побудовано порівняльні діаграми зношування покриттів TiN та комбінованого покриття азотований шар + TiN, які представлено у вигляді глибини пошкодження шару, вимірної відносно площини непошкодженої поверхні. Кут натікання на зразки —  $15^\circ (\pi/12)$ .

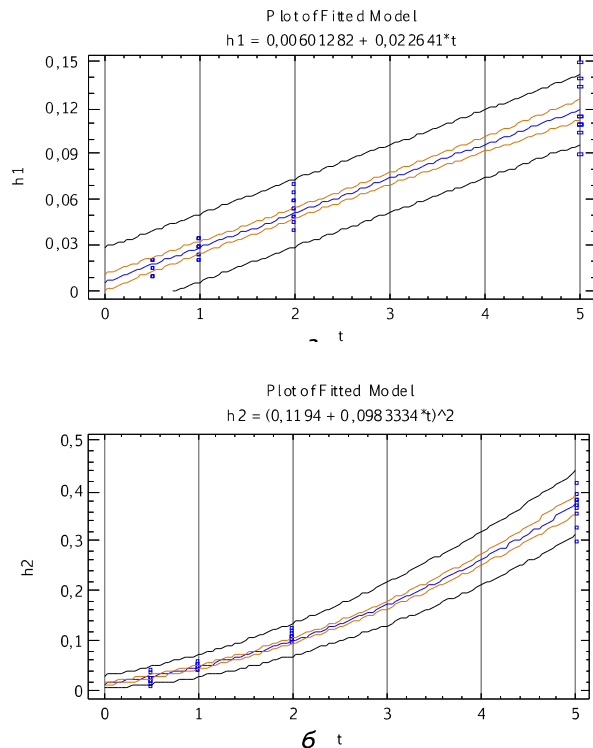


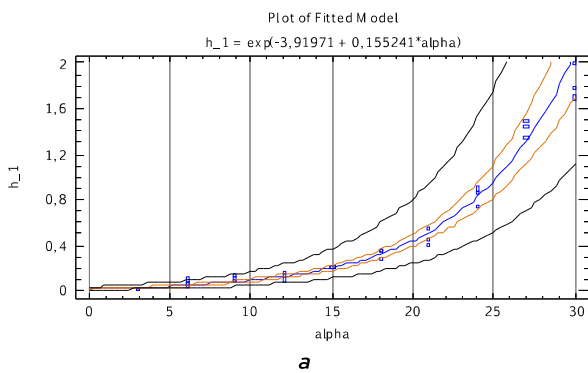
Рисунок 9 — Порівняльні діаграми зношування покриття TiN (а) та комбінованого покриття азотований шар + TiN (б).

Встановлено, що динаміка пошкодження захисних покриттів принципово відрізняється: покриття TiN зношувалося більш динамічно, і протягом 3 хв. пошкодження досягало максимуму. Після цього швидкість пошкодження уповільнилася і на зразках почали спостерігатися зони

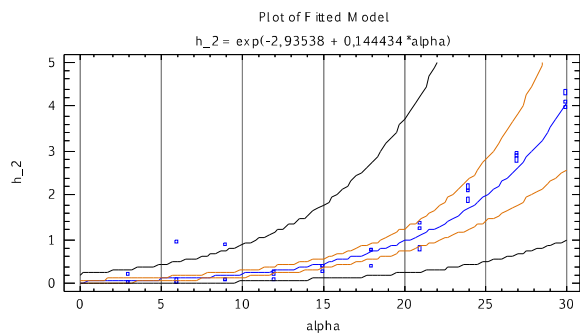
майже повного його вилучення. У подальшому розпочалося активне руйнування матеріалу підложки (рисунок 10).



Рисунок 10 — Досліджувані зразки.



а



б

Рисунок 11 — Залежність зношування покриття TiN (а) та комбінованого покриття азотований шар + TiN від кута натікання струменя (б).

Зразки із комбінованим покриттям були більш стійкими до рідинно-абразивного і кавітаційного зношування (майже у 3 рази). Зношування відбувалося рівномірно, без утворення областей відшарування.

На показаних діаграмах (рисунок 11) подано залежність ступеня пошкодження у вигляді глибини лунки ( $h$ ), що утворюється на поверхні протягом плинного часу. Побудовано залежність зміни глибини сформованої лунки у функції кута натікання струменя  $\alpha$ .

Вплив кута натікання струменя на швидкість знімання покриття визначали шляхом вимірювання проникнення струменя у досліджуваній зразок за час, що дорівнює 1 хв (рисунок 11).

Виміри здійснювали у діапазоні кутів від  $3^\circ$  ( $\pi/60$ ) до  $30^\circ$  (подальше збільшення кутів призводить до повного руйнування покриття та основи і отримання пазу біля 3–4 мм). Адекватність отриманих моделей — 0,95.

## Висновки

За отриманими даними неважко зробити висновок, що найбільш ефективно працює покриття при дотичному натіканні струменя. Прийнятий час спрацювання — 1 хв не є показовим, оскільки таку тривалість необхідно було установити для забезпечення порівняності вимірів динаміки зношування при більших кутах натікання.

Порівняння стійкості зразків із покриттями та без покриття доводить, що покриття дозволяє отримати двозонну динаміку зростання вихідного отвору калібрувальної трубки: до часу спрацювання покриття та при роботі трубки з вже зношеним покриттям.

Порівняльні експериментальні випробування показали, що залежно від режимів технологічного процесу обробки, зразки з комбінованим покриттям з азотованого шару і TiN зношуються менш інтенсивно, ніж зразки без покриття при спливанні гідроабразивного потоку.

З усіх параметрів —  $D_k$ ,  $\delta_{DK}$ ,  $\gamma_{DK}$ ,  $\lambda_{DK}$  (рисунок 6) нанесення функціонального покриття дозволяє зменшити  $\gamma_{DK}$  тим самим підвищивши термін експлуатації трубки до прогнозованого настання відмови як  $T_3 = D_k - D_i / \gamma_{DK}$ .

Отримано функціональні залежності зношування калібрувальної трубки з покриттями за критеріями гідроабразивної стійкості доповнюють загальну методологічну інформаційну базу і безумовно сприяють розробці принципу управління властивостями поверхневого шару.

## Література

1. Перспективы развития водоструйной и водо-абразивоструйной обработки. Looking downstream. Amer. Mach. 2001. 145, № 3. — С. 80—82, 84, 86, 88, 90. Англ.
2. Саленко, О.Ф. Перспективы рынка оборудования для листовой обработки / Саленко А.Ф., Фомовська О.В. // Вісник КДПУ, №6 (48) 2008. — с. 45-50.
3. Степанов В.С., Барсуков Г.В. Современные технологические процессы механического и гидроструйного раскрытия технических тканей. Библиотека технолога. — М.: Машиностроение, 2004. — 240 с.
4. Цыгановский, А.Б. Определение степени влияния угла атаки струи на производительность и качество гидроабразивной обработки затопленными струями // Вісник СНУ ім. В.Даля. — 2009. — № 6. — С. 220—228.
5. Проволоцкий, А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей. — К.: Техника, 1989. — 177 с.
6. Непомышый, Е.Ф. Трение и износ под воздействием струи твердых частиц // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. — М.: Наука, 1971. — С. 190—200.
7. Клейс, И.Р. Основы выбора материалов для работы в условиях газоабразивного изнашивания // Трение и износ. — 1980. — Т. 1. — № 2. — С. 263—271.
8. Билик, Ш.М. Абразивно-жидкостная обработка металлов. — М.: Машиностроение, 1960. — 198 с.
9. Подураев, В.Н., Камалов В.С. Физико-химические методы обработки / Подураев, В.Н., Камалов В.С. — М.: Машиностроение, 1973. — 346 с.
10. Виноградов, В.Н. Абразивное изнашивание / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, М.Г. Колокольников. — М.: Машиностроение, 1990. — 224 с.

Надійшла 20.04.2012 р.