

УДК 621.9.044:62-192

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПРОЦЕСУ ГІДРОАБРАЗИВНОГО РІЗАННЯ ЗА РАХУНОК ЗАСОБІВ АКТИВНОГО КОНТРОЛЮ ЛАЗЕРНИМ ПРОМЕНЕМ

В. О. ДудюкКременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: dva_1983@mail.ru

Для забезпечення якості та надійності різання при повному вичерпуванні ресурсу високовартісних швидкозношуваних елементів струменеформуючої системи необхідно вести постійний контроль їхнього стану. Постійний контроль забезпечує оригінальний пристрій, який базується на отриманні картин розподілу лазерного випромінювання при проходженні струминки рідини, що витікає із струменеформуючої системи. Встановлено, що параметри отриманих картин розподілу мають кореляційний зв'язок зі ступенем зношеності струминної системи. Для якісної оцінки працеспроможності елементів струминної системи проведення діагностики необхідно здійснювати, коли рідина до неї надходить під попереднім тиском $0,4 \pm 0,015$ МПа. На основі проведених досліджень були отримані регресійні рівняння залежності параметрів інтенсивності випромінювання та параметрів зношеності елементів струменеформуючої системи. Даний прилад дозволить визначати ступінь зношеності елементів системи (сопла, калібрувальної трубки) і швидкість розвитку пошкоджень.

Ключові слова: гідроабразивне різання, швидкозношувальні елементи, надійність, засоби контролю.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРОЦЕССА ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ ЗА СЧЕТ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧЕМ

В. А. ДудюкКременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: dva_1983@mail.ru

Для обеспечения качества и надежности резки при полном использовании ресурса дорогостоящих быстро изнашивающихся элементов струеформирующей системы необходимо вести постоянный контроль их состояния. Постоянный контроль обеспечивает оригинальное устройство, базирующийся на получении картин распределения лазерного излучения при прохождении струйки жидкости, вытекающей из струеформирующей системы. Установлено, что параметры полученных картин распределения имеют корреляционную связь со степенью изношенности струйной системы. Для качественной оценки работоспособности элементов струйной системы проведение диагностики необходимо проводить, когда жидкость в нее поступает под предварительным давлением $0,4 \pm 0,015$ МПа. На основе полученных исследований были получены регрессионные уравнения зависимости параметров интенсивности излучения и параметров износа элементов струеформирующей системы. Данный прибор позволит определять степень изношенности элементов системы (сопла, калибровочной трубки) и скорость развития повреждений.

Ключевые слова: гидроабразивная резка, быстроизнашивающиеся элементы, надежность, средства контроля.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Оскільки формування поступової відмови відбувається у досить широкому часовому діапазоні $T_{крит} - T_0$, що становить період часу напрацювання до 40 годин [1, 2], а забезпечення ефективності різання передбачає повне вичерпування ресурсу коштовних швидкозношуваних елементів, постає необхідність розробки системи активного (або періодичного) контролю стану струменеформуючих елементів (соплові насадки та калібрувальної трубки). Це надасть змогу точно визначати динаміку розвитку пошкодження γ_D та γ_d і встановлювати запас надійності як $(D_k - D_i)$; $(d_r - d_0)$ або час до прогнозованого настання відмови як $T_3 = \frac{D_k - D_i}{\gamma_D}$ при першочерговому пошкодженні калібрувальної трубки або $T_3 = \frac{d_k - d_i}{\gamma_d}$ при першочерговому пошкодженні сопла.

У роботі [3] було показано можливості використання оптичної системи, побудованої на ОКГ низької потужності, для моніторингу зони струминної ерозії. В ній зазначалося, що зміна умов стікання рідини фронтом борозенки різа призводить до функціональних змін параметрів розсіювання плями

відбитого випромінювання, контроль яких дозволяє виконувати потрібні корективи режиму ведення обробки. Оскільки подібна система може використовуватися виключно для струминної обробки (різання струменем чистої рідини без абразивних домішок), контроль стану елементів струменеформуючого пристрою доцільно виконувати за тим же принципом – отримання контрольної плями лазерного випромінювання шляхом використання різних технічних пристроїв. Насправді, нехай кут розходження випромінювання при виході за межі резонатора становить $\Theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}$. Тоді мінімальний діаметр перетяжки каустики для одномодового лазера при глибині фокусу $z = \pm \frac{0,32 \pi d^2}{\lambda}$ становитиме [4]:

$$d_n = \frac{4 F \lambda}{\pi d} \quad (1)$$

де F – фокусна відстань оптики (лінзи або дзеркала); d – діаметр лазерного променя.

Розглянемо розрахункову схему (рис. 1). Нехай промінь лазера 1 за допомогою дзеркал 2 прямує крізь струмінь рідини, що витікає з калібрувальної трубки.

Промінь ОКГ, інтенсивність якого з відомим ступенем припущення для твердотільних лазерів підкоряється композиційному закону розподілу виду

$$I(x) = \frac{1}{2\lambda\sigma} \left[F\left(\frac{x-a_0}{\sigma_0}\right) - F\left(\frac{x-a_0-2\lambda_a\sigma_0}{\sigma_0}\right) \right],$$

де a_0, σ_0, λ_a – параметри закону розподілу з функцією $a(t)$, F – функція Лапласу від зазначених аргументів, потрапляє на струмінь, і далі, частково відбиваючись, а частково поглинаючись і розсіюючись рідиною, надходить до фотофіксуючого пристрою 4.

Коефіцієнт відбиття R_0 є співвідношенням інтенсивності відбитої частини випромінювання до інтенсивності всього падаючого випромінювання. Для випадку нормального падіння променя

$$R_0 = \frac{(n-1)^2 + n^2\chi^2}{(n+1)^2 + n^2\chi^2} \quad (2)$$

де n – показник заломності середовища; χ – коефіцієнт затухання.

Унаслідок того, що промінь ОКГ прямує крізь потік, в якому відбувається процеси появу і злиття каверн, ковзання шарів, вихрові явища, величина R_0 буде іншою. Багатократне відбиття від границь «рідина-газ» призводитиме до збільшення плями випромінювання. Рухомість потоку, його розвиненість впливатимуть на форму плями випромінювання, оскільки саме ці чинники обумовлюватимуть кількість границь відбиття, їх появу і зникнення.

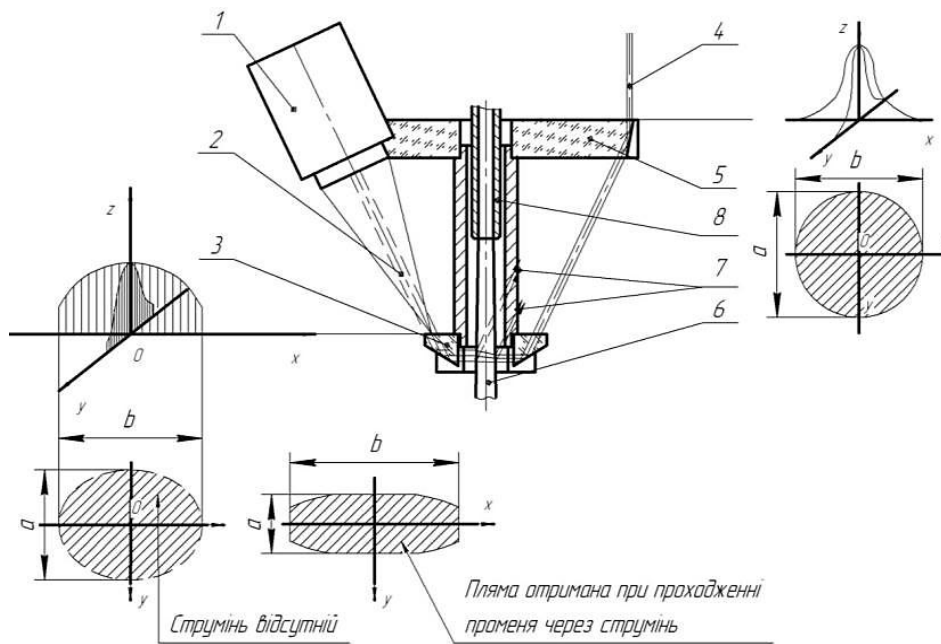


Рисунок 1 – Формування плями відбитого випромінювання при просвічуванні струменя швидкоплинної рідини променем ОКГ низької потужності

Так як узагальненою характеристикою потоку є число Рейнольдса (воно змінюється при зміні умов витікання рідини із насадку), то робочою гіпотезою є залежність інтенсивності плями просвіченого випромінювання I та геометричних розмірів плями (на півосей еліпсу a та b) від цієї характеристики.

Зважаючи на те, що зношення сопла призводить до збільшення розміру отвору сопла d_c та до скорочення довжини l_k компактного ядра, внаслідок чого зменшиться глибина прорізання матеріалу h , параметр X_c , що є відношенням інтегральної інтенсивності, знятої фотофіксуючим пристроєм 1 до початкової інтенсивності променя (визначеної за розмахом сигналу як скравості), становитиме:

$$X_c = f(\text{Re}); \quad \text{Re} = \frac{d_c v_p}{\nu} \quad \begin{matrix} a = f(\text{Re}) \\ b = f(\text{Re}) \\ I = f(\text{Re}) \end{matrix} \quad (3)$$

тобто буде однозначно визначатися a, b, I .

З практичної точки зору найбільш важливим є оцінка зміни контрольованого параметра при зміні

різальної здатності струменя, визначеної як зменшення глибини прорізання матеріалу при фіксованих значеннях робочої подачі.

Оскільки під час витікання рідини із соплового пристрою відбувається ряд гідромеханічних явищ, які носять стохастичний характер, параметри струменя визначатимуться як випадкові величини динамічного ряду, усереднені за певним часом Δt_y .

Розглянемо рис. 2. Зношення елементів струменеформуючої системи неодмінно призводитимуть до зміни енергетичних та геометричних параметрів струменя: так, збільшення отвору витікання рідини веде до падіння тиску p , до зростання оболонкової частини струменя та скорочення ядра понад критичний рівень.

Для визначення корельованості сигналу інтенсивності випромінювання плями ОКГ та глибини прорізання h скористаємося підходом, висвітленим у [4]. Розглянемо два випадкові процеси $y^*(t)$ і $x^*(t)$. Для цих процесів визначена взаємна кореляційна функція:

$$R_{xy}(t, t') = M [y_0^*(t')x_0^*(t)] \quad (4)$$

де $x_0^*(t), y_0^*(t')$ – центровані значення випадкових процесів.

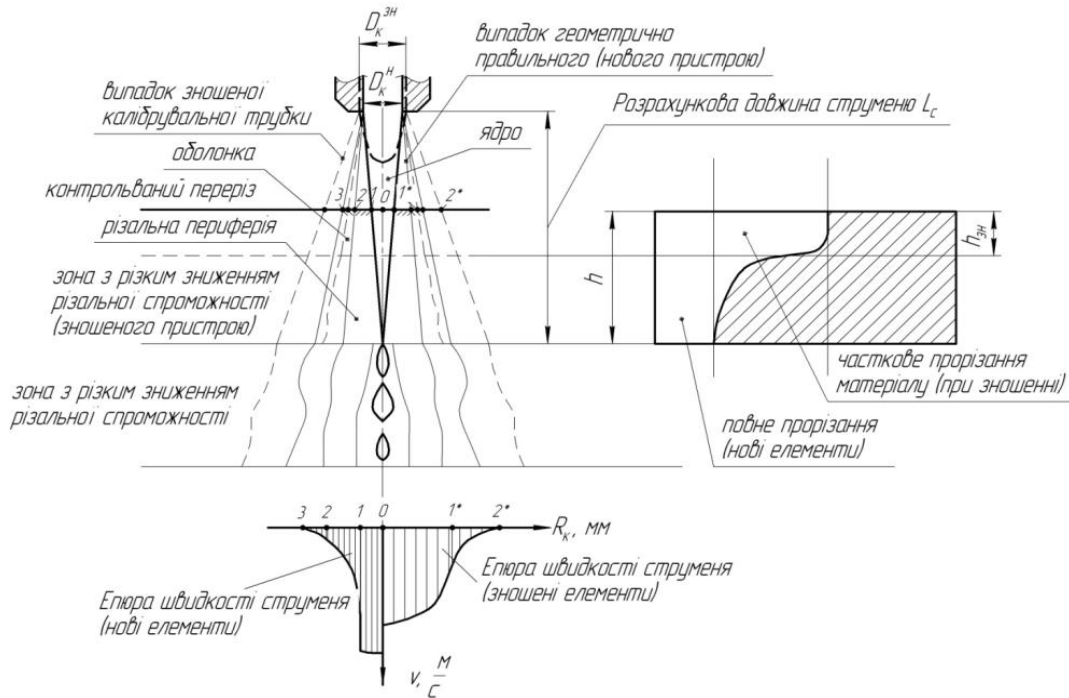


Рисунок 2 – Зміна геометричних параметрів струменя та його різальної спроможності при зношуванні елементів струменеформуючої системи

Аналізованими функціями будуть сигнали із фотоелектричного перетворювача P_f та з приладу контролю глибини лунки.

Дослідженнями встановлено, що отримати задовільну картину просвіченого крізь робочий струмінь випромінювання не вдалося, оскільки наявність частинок абразиву призводила до того, що відчутною була шумова емісія (рис. 3). Перевірка дорівнює кореляції між ступенем зношування і зміною форми (параметри a, b) та інтенсивності (I) плями розподілу і показала, що такий зв'язок слабо визначений (табл. 1), за винятком параметру I , для якого $r_{I-h} = -0,763$ і який обумовлений розсіюванням випромінювання внаслідок зростання діаметру отвору калібрувальної трубки від $D_{kном}$ до D_{kmax} .

Таблиця 1 – Розрахунок коефіцієнта кореляції параметрів a, b та I з рівнем пошкодження струминної системи (визначеною за h , мм)

Коефіцієнти кореляції			
Параметр	r_{I-h}	r_{a-h}	r_{b-h}
Нова система	-0,763	-0,27	-0,445
Критичний знос	-0,827	-0,32	-0,41

Зазначене явище пояснюється тим, що зростання оболонкової частини струменя та сповільнення руху частинок абразиву збільшує розсіювання променя та частково змінює його напрямок.

Однак встановити ступінь зношення самого сопла не вдалося.

Було прийняте рішення про проведення діагностики в момент, що передує початку роботи гідрорізної системи, тобто коли у струменеформуючу сис-

тему надходить рідина під попереднім тиском $0,4 \pm 0,015$ МПа, що забезпечується регулятором тиску магістралі живлення станції високого тиску.

При цьому, використання нових і точно встановлених струменеформуючих елементів давало змогу спостерігати тривалий та сталий струмінь визначеної товщини (рис. 3), що давав певну картину розподілу випромінювання, зафіксовану фотоелектричним пристроєм. Зношування елементів неодмінно призводило до появи розвиненого струменя, який чітко фіксувався приладом, що відповідало припущенню стосовно обумовленості плями просвіченого випромінювання режимами течії рідини. Таким чином, прийняте рішення про встановлення кореляційного зв'язку між параметрами зношування та відповідним зменшенням глибини прорізання заготовки h_i та параметрами зафіксованої плями (a, b та інтенсивності I).

Результати досліджень показано на рис. 3 і зведено до табл. 2.

При проведенні досліджень та визначенні результуючих параметрів розглядали чотири випадки

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= f(D_{k1}; d_{c1}) \\ h_2 &= f(D_{k2}; d_{c1}) \\ h_3 &= f(D_{k1}; d_{c2}) \\ h_4 &= f(D_{k2}; d_{c2}) \end{aligned} \right\} I_1 = f(d_{c1}) \left. \vphantom{\begin{aligned} h_1 &= f(D_{k1}; d_{c1}) \\ h_2 &= f(D_{k2}; d_{c1}) \\ h_3 &= f(D_{k1}; d_{c2}) \\ h_4 &= f(D_{k2}; d_{c2}) \end{aligned}} \right\} I_2 = f(D_{ki})$$

де D_{k1} – отвір нової калібрувальної трубки, мм;
 D_{k2} – отвір зношеної калібрувальної трубки, мм;
 d_{c1} – отвір нового сопла, мм; d_{c2} – діаметр отвору зношеного сопла, мм.

Після статистичного опрацювання отриманих значень із ПЗЗ – матриці інтенсивності випромінювання і при сталій витраті абразиву 0,7 кг/хв (табл. 3)

у середовищі Statgrafik 5+ побудовано регресійні криві та отримано відповідні рівняння (рис. 4).

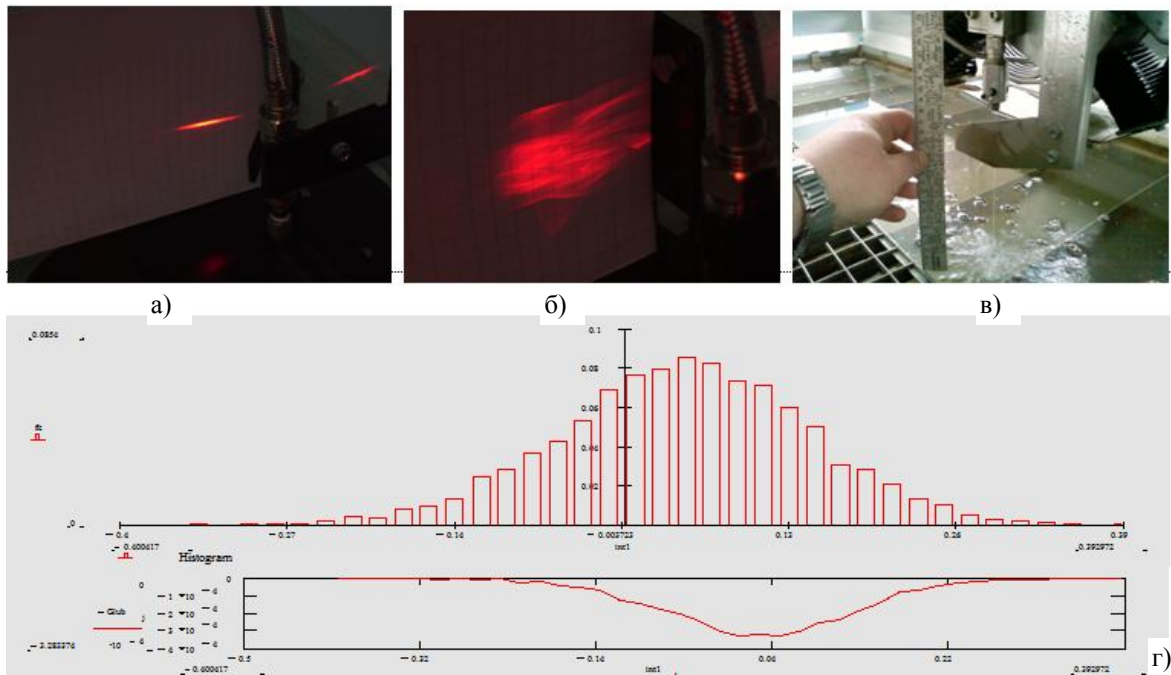


Рисунок 3 – Плями просвіченого випромінювання (а), отримані при близькому до ламінарного руху рідини із сопла (б), фото струменя рідини на ЛСК–5–400 (в) і побудована на основі опрацювання сигналу із фотоелектронного перетворювача гістограма інтенсивності (г)

Таблиця 2 – Характерні зміни плями розподілу ОКГ в залежності від зносу отвору соплової насадки

№	Точки вимірів	Фото отвору	Фото плями ОКГ	Розмір вісей еліпса плями розподілу ОКГ		Інтенсивність I_2 Вт/мм ²	Глибина прорізання h , мм	Коефіцієнти кореляції			Час стійкості t , год
				a	b			r_a	r_b	r_l	
1	Нова калібрувальна трубка			40	60	3,6	20	0,47	0,54	0,87	0
2	Зношена калібрувальна трубка			60	60	1,4	8	0,33	0,58	0,78	20
3	Нове сопло			3	80	3,3	20	0,26	0,62	0,82	0
4	Зношене сопло			60	70	1,5	8	0,32	0,48	0,76	12

При аналізі розподілу точок на координатному полі було прийняте рішення про постулювання регресійних моделей у вигляді $y = b_0 + b_1 \cdot x$ та $y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2$. Встановлено, що залежність інтенсивності випромінювання (I_1 , Вт/мм²) від зносу калібрувальної трубки задовільно описується

лінійною моделлю, яка для витрати $M_a=0,7$ кг/хв має вигляд $I_1 = 5,99 - 2,95 \cdot D_k$ (із рівнем значимості 96,67 %), а для витрати $M_a=0,3$ кг/хв. – $I_2 = 7,14 - 3,56 \cdot D_k$ (із рівнем значимості 98,74 %).

Дослідження зношення соплового насадку показало, що більш адекватною є квадратична модель

виду $I = 0,710 + 17,16 \cdot d_s - 28,64 \cdot d_s^2$ (із рівнем значимості 98,82 %).

джуються з фізичною сутністю явищ і з результатами, висвітленими науковцями [5–7].

Отримані результати в цілому задовільно узго-

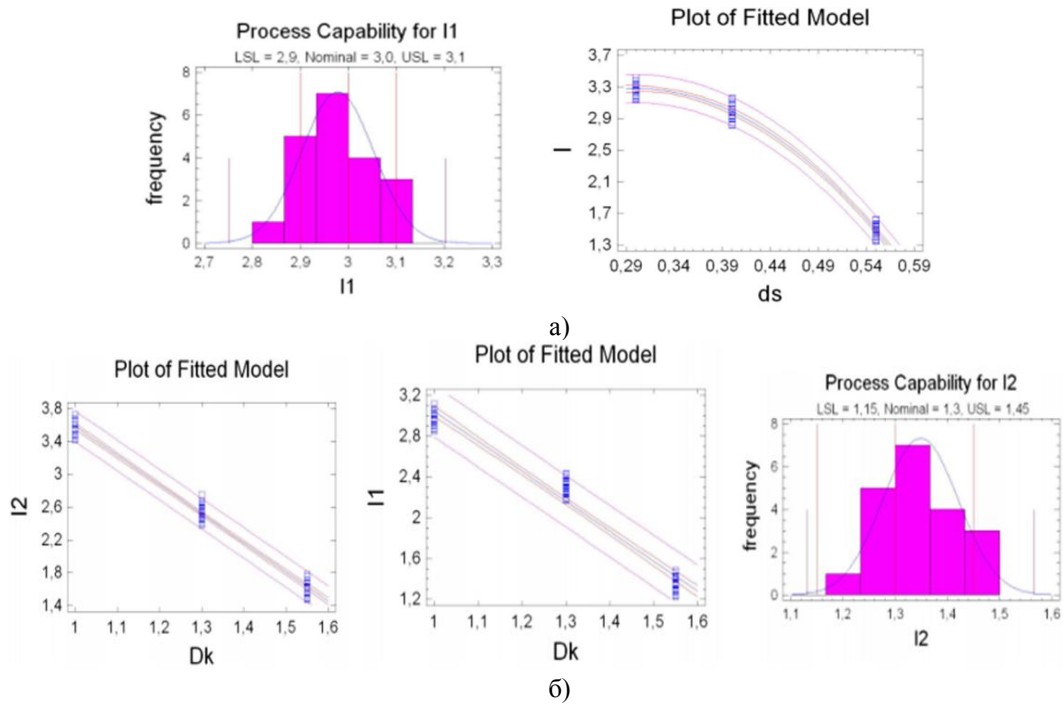


Рисунок 4 – Результати статистичного опрацювання досліджуваної величини (інтенсивності просвіченого випромінювання від ОКГ низької потужності) при визначенні впливу явищ зношування сопла (а) та калібрувальної трубки (б)

Таблиця 3 – Статистична вибірка усереднених значень рівнів сигналу із ПЗЗ-матриці

D_k , мм	Усереднене максимальне значення картин інтенсивності випромінювання (витрата абразиву 0,7 кг/хв) I_1 , Вт/мм ²	Усереднене максимальне значення картин інтенсивності випромінювання (витрата абразиву 0,3 кг/хв) I_2 , Вт/мм ²	Усереднена дисперсія випадкової величини $\sigma_{\gamma_{I_k}}$
1	3	3,6	0,0738
1,3	2,2	2,8	
1,55	1,3	1,4	
d_s , мм	Значення інтенсивності	Усереднене (за 10 вимірами) значення картин інтенсивності випромінювання I , Вт/мм ²	Усереднена дисперсія випадкової величини $\sigma_{\gamma_{I_s}}$
0,3		3,3	0,0819
0,4		3,1	
0,55		1,5	

ВИСНОВКИ. Таким чином, періодичне зняття за допомогою приладу рис. 1 усередненого рівня сигналу інтенсивності випромінювання і дозволяє визначити ступінь зношення окремих елементів струменеформуючої системи та внести коригування в очікуване значення швидкостей розвитку пошкоджень $\gamma_{D_k}, \gamma_{d_s}$, а також запас надійності.

Отримані результати покладені в основу розробки нового технічного рішення для автоматизованого визначення запасу стійкості струменеформуючих елементів фірми Allfi встановлене на промислове гідрорізне обладнання типу ГАР-400.

ЛІТЕРАТУРА

1. Саленко А.Ф., Дудюк В.А. Надежность процесса струйного резания (начало) // *Металлообработка. Международный информационно-технический журнал. Оборудование и инструмент для профессионалов.* – Харьков, 2010. – № 5/2010. – С. 22–26.
2. Саленко А.Ф., Дудюк В.А. Надежность процесса струйного резания (продолжение) // *Металлообработка. Международный информационно-технический журнал. Оборудование и инструмент для профессионалов.* – Харьков, 2010. – № 6/2010. – С. 22–23.
3. Використання оптичних пристроїв на базі когерентного джерела випромінювання як датчиків контролю для гідrorізного обладнання / О.Ф. Саленко, В.О. Дудюк // *Промислова гідраліка і пневматика.* – Вінниця, 2007. – Вип. 4 (18). – С. 85–90.

4. Аналіз розподілу потужності випромінювання оптичного квантового генератора (ОКГ) у потоці рідини малого діаметра / В.О. Дудюк, О.Ф. Саленко // *Вісник НТУ КІП.* – 2009. – № 57. – С. 148–152.

5. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. – М.: Наука, 1965. – 524 с.

6. Технологія моделювання динамічних процесів та систем: монографія / Струтинський В.Б., Веселова Н.Р. – Вінниця: О. Власюк, 2007. – 466 с.

7. Salenko A.F., Fomovska O.V., Dudyuk V.A., Mana O.M. (2010) "Some results of exploration of water jet guided laser onto the solids' surface", *Unitex: International scientific conference*, 19–20 november, Gabrovo, pp. 414–421.

INCREASE OF REABILITY OF THE HYDROABRASIVE CUTTING PROCESS BY LASER BEAM AT THE EXPENSE OF ACTIVE CONTROL MEANS

V. Dudyuk

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: dva_1983@mail.ru

In order to provide the quality and reability of cutting while complete exhaust of the resources with high expensive wearable elements of spurt-forming system it becomes important to put continual control under their condition. Continual control is provided by original device, which is based on acquiring images of distribution of laser radiation while passing of the liquid trickle, which flows out spurt forming system. It has been established that the parameters of received images of distribution have correlative connection with the wear level of the spurt forming system. Thus, for qualitative valuation of working capacity of elements of spurt system it is necessary to make diagnostics at the conditions when the liquid comes to it under the preceding pressure of $0,4 \pm 0,015$ MPa. At the basement of the research there were received regressive equations of dependence between the parameters of radiation intensity and parameters of wear of spurt forming system. Given device will be able to allow to determine the level of wear of system's elements (nozzle, calibrating pipe) and speed of progress of damages.

Key words: hydroabrasive cut, high wearable elements, reability, means of the control.

REFERENCES

1. Salenko, A.F., Dudyuk, V.A. (2010), "Reliability of jet cutting process (beginning)", *Metalloobrabotka. Mezhdunarodnyiy informatsionno-tehnicheskizhurnal. Oborudovanie i instrument dlya professionalov*, no. 5, pp. 22–26.
2. Salenko, A.F., Dudyuk, V.A. (2010), "Reliability of jet cutting process (continued)", *Metalloobrabotka. Mezhdunarodnyiy informatsionno-tehnicheskizhurnal. Oborudovanie i instrument dlya professionalov*, no. 6, pp. 22–23.
3. Salenko, O.F., Dudyuk, V.O. (2007), "The use of optical devices based on coherent radiation source as control sensors for hydrocutting equipment", *Promislova gidravlika i pnevmatika. Vseukrayinskiy naukovotekhnichniy zhurnal, Vinnytsya*, issue 4, no.18, pp. 85-90.
4. Dudyuk, V.O., Salenko, O.F. (2009) "Analysis of the distribution of the radiation optical quantum generator (OQG) in a fluid stream of small diameter", *Journal of mechanical engineering, Collection of scientific papers, NTUU «KPI»*, no. 57, pp. 148–152.

5. Gnedenko, B.V., Belyayev, Yu.K., Solovyov, A.D. (1965), *Matematicheskiye metody v teorii nadezhnosti* [Mathematical Methods in Reliability Theory], Nauka, Moscow, USSR.

6. Strutynskyy, V.B., Veselova, N.R. (2007), *Tekhnologiya modelyuvannya dynamichnykh protsessiv ta system: monografiya* [Technology modeling of dynamic processes and systems], O. Vlasjuk, Vinnytsya, Ukraine.

7. Salenko, A.F., Fomovska, O.V., Dudyuk, V.A. et al (2010), "Some results of exploration of water jet guided laser onto the solids' surface", *Unitex: International scientific conference*, November 19–20 Gabrovo, pp. 414–421.

Стаття надійшла 03.03.2015.