

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ ГІДРОАБРАЗИВНОГО РІЗАННЯ ДЛЯ СУЧАСНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

В. О. Дудюк

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

П. П. Мельничук

Житомирський державний технічний університет
вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, 10005, Україна.

Для встановлення параметрів математичної моделі проведено аналіз технічної системи гідрорізання, при цьому враховані повільноплинні процеси зношення елементів системи та визначені ті, що виходять з ладу раптово. Для встановлення впливу відмов різноманітного характеру на процес та якість різання композиційних матеріалів, виконано моделювання в прикладному пакеті Flowvision. Встановлено, що технологічні параметри та фізико-технічні властивості матеріалу впливають на ступінь зношення елементів гідроабразивного різання. На основі отриманих даних, для підвищення надійності та стабільності гідроабразивного різання запропоновано обертати калібрувальну трубку навколо своєї осі. Так як основним показником надійності є виникнення відмов різноманітного характеру, то адекватність і точність математичної моделі буде залежати від правильності їх визначення. Особливістю процесу гідроабразивного різання є те, що робочий інструмент (гідроабразивний потік) формується за рахунок струменеформуючих елементів обладнання в результаті чого вони зношуються і руйнуються. При цьому руйнування елементів можливе, як поступове так і раптове.

Ключові слова: математична модель, гідроабразивне різання, надійність, відмови, струменеформуючі елементи, композиційні матеріали.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. А. Дудюк

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

П. П. Мельничук

Житомирский государственный технический университет
ул. Черняховского, 103, г. Житомир, 10005, Украина.

Для установления параметров математической модели проведен анализ технической системы гидрорезания, при этом учтены медленно протекающие процессы износа элементов системы и определены те, которые выйдут из строя внезапно. Для установления влияния отказов разнообразного характера на процесс и качество резания композиционных материалов, выполнено моделирование в прикладном пакете Flowvision. Установлено, что технологические параметры и физико-технические свойства материала влияют на степень износа элементов гидроабразивного резания. На основе полученных данных, для повышения надежности и стабильности гидроабразивного резания предложено вращать калибрующую трубку вокруг своей оси. Так как основным показателем надежности является возникновение отказов разнообразного характера, то адекватность и точность математической модели будет зависеть от правильности их определения. Особенностью процесса гидроабразивного резания является то, что рабочий инструмент (гидроабразивный поток) формируется за счет струеформирующих элементов оборудования, в результате чего они изнашиваются и разрушаются. При этом разрушение элементов возможно, как постепенное, так и внезапное.

Ключевые слова: математическая модель, гидроабразивное резание, надежность, отказы, струеформирующие элементы, композиционные материалы.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Питаннями забезпечення надійності складних технічних систем і процесів займалися такі провідні фахівці як, Н. Arasawa, J. Bendat, A. David, D. Tabor, A. Проніков та ін. Враховуючи дослідження авторів [1–4], зроблено висновок про необхідність виявлення природи пошкоджень елементів струменеформуючої системи.

Оскільки нині єдиного підходу до визначення надійності процесу гідроабразивного різання не існує, значний науково-практичний інтерес являє пошук функціональної обумовленості та адекватного математичного опису ймовірності виникнення відмов, ідентифікація якого дозволить запропонувати нові технічні рішення з підвищення сталості процесу гідроабразивного різання та знизити втрати від

браку сучасних композиційних матеріалів, що описані в роботах [5–8].

Мета роботи – створення математичної моделі надійності гідроабразивного різання із врахуванням впливу технологічних чинників та фізико-технічних особливостей оброблюваного матеріалу.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Відповідно до ДСТУ 2470-94 відмова технологічної системи – це подія, внаслідок якої припиняється функціонування технологічної системи, що не передбачено регламентованими умовами виробництва чи вимогами конструкторської документації. Вона може бути параметричною - за якої зберігається функціонування системи, але відбувається виходження значення одного чи декількох параметрів технологічного процесу за межі, які встановлені в нормативно-технічній і (чи)

конструкторській документації, або власною – відмовою технологічної системи внаслідок порушення працездатного стану її елементів і (чи) функціональних зв'язків між ними. Якщо відмова технологічної системи настає внаслідок порушення регламентованих для цієї системи умов виробництва, вона класифікується як вимушена.

Основними показниками надійності технологічної системи стандарт визначає: імовірність безвідмовної роботи технологічної системи за параметрами продукції.

Момент виникнення відмови пов'язаний із ступенем віддаленості певного параметра від його граничного стану. Як відомо за класифікацією існують такі види відмов:

- поступові (зношувальні) відмови виникають у результаті протікання того або іншого процесу старіння, що погіршує початкові параметри виробу;
- раптові відмови виникають у результаті комбінації несприятливих факторів і випадкових зовнішніх впливів, що перевищують можливості виробу до їхнього сприйняття.

Відмова власна приводить до того, що як елемент, так і виріб в цілому не може виконувати своїх функцій. Параметрична відмова приводить до виходу параметрів виробу за припустимі межі.

Якщо процес зміни параметра починається відразу ($T_e=0$), то має місце типова схема виникнення поступової параметричної відмови. Якщо по досягненні X_{max} різко зростає $X(t)$, то, як правило, виникне відмова функціонування. Модель раптової відмови є частковим випадком протікання процесу пошкодження з високою інтенсивністю $X(t) \rightarrow \infty$.

Виявлення закону розподілу необхідне для прогнозування поведінки виробу або відтворюваності технології з огляду оцінки вірогідності виникнення відмови.

Для процесу гідроабразивного різання відмова полягатиме у неможливості ефективно виконувати задалегідь визначене формоутворення, яке характеризується геометричними параметрами (виконавчими розмірами Z_i) і допуском на взаємне розташування поверхонь (T_n) і на виконувані розміри (T_{Zi}), а у випадку гідроабразивного різання композитних заготовок – перевищенням деструктивного шару крайки встановлених меж [7–10], забрудненістю поверхні частинками абразиву та ін. Тобто відмова може настати у разі, коли для певної деталі, наприклад, прямокутної пластинки, не виконуватиметься один із наведених на рис. 1 показників: $L \pm \Delta l$, $B \pm \Delta b$, $\Delta h/h$.

Оскільки формування гідроабразивного струменя відбувається як наслідок значної кількості процесів, що носять, у тому числі, і ймовірнісний характер, пошук адекватного математичного опису зміни контрольованих параметрів і визначення на їх основі ймовірності виникнення відмов є актуальною науково-практичною задачею, розв'язання якої дозволить запропонувати нові технічні рішення з підвищення надійності гідрорізної системи, знизити вартість обробки.

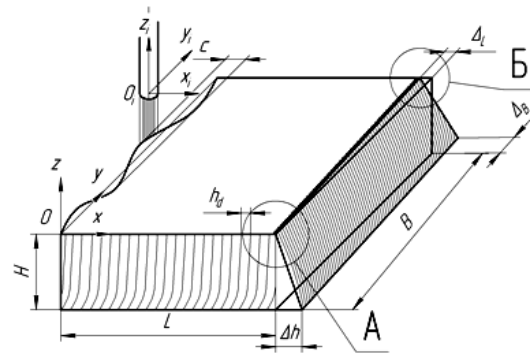


Рисунок 1 – Можливі відхилення показників якості при гідрорізному різанні

Технологічна гідрорізана система досить складна та має розгалужену структуру. Зношування окремих елементів, що безпосередньо формують швидкоплинний двофазний потік, відбувається з різною динамікою, і для збереження надійності процесу нехтують їх залишковим ресурсом, проводять передчасну заміну, що значно здорожує обробку, оскільки такі елементи є коштовними (від 100 до 500 євро). Інші негативні явища (наприклад, несталості подачі абразиву) вимагають пошуку нових шляхів забезпечення сталості.

Початкові просторові відхилення та похибки складання елементів струменеформуючого пристрою не залишаються постійними, а змінюються внаслідок прояву процесів зношування, і, відповідно, змінюють умови формування гідроабразивного струменя. Тільки за умови абсолютної точності розмірів та просторових положень окремих поверхонь можливе отримання ідеального, геометрично правильного потоку, з параметрами розподілу швидкостей і частинок абразиву, який рівномірно зношує калібруючу трубку.

Звичайно, неточності виготовлення, похибки складання елементів струменеформуючого пристрою у вузол не можуть викликати настання відмови, однак розсіювання початкових відхилень викликає суттєве зростання границь ймовірних значень лімітуючих параметрів пристрою, який, власне, і визначає його працеспроможність.

Загальна схема втрачання роботоспроможності системи може бути представлена так (рис. 2). Під час складання елементів струменеформуючого пристрою виникають просторові похибки, а самі елементи пристрою мають початкові розсіювання власних параметрів. Такими параметрами є: діаметр струменеформуючого сопла d_c та відхилення реального отвору від геометрично правильного кола, діаметр отвору калібрувальної трубки D_k та відповідне відхилення реального отвору від геометрично правильного кола, коефіцієнт витрати сопла μ_c , обумовлений початковим профілем каналу, неспіввіднесеність сопла та калібрувальної трубки; властивості абразиву, що знаходиться в калібрувальній трубці та в каналі підведення.

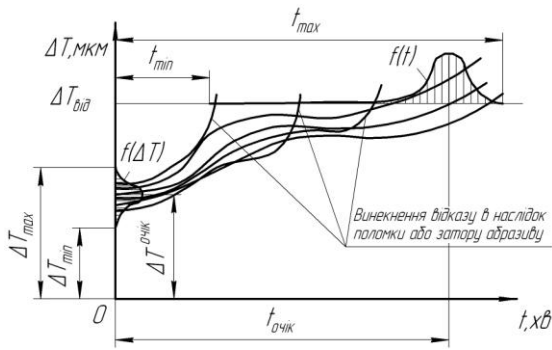


Рисунок 2 – Виникнення відмов струменеформуючої системи з урахуванням раптових відмов її елементів

Процес гідроабразивного різання матиме нормальний хід у випадку, якщо не буде перевищений допуск на виконуваний розмір T_b , мкм, а робоча подача s , мм/хв, забезпечуватиме повне прорізання матеріалу товщиною h , мм, тобто продуктивність процесу W , мм³/хв., буде знаходитися у встановлених межах. Безвідмовність гідрорізної системи з огляду на вищезазначене являтиме собою:

$$P(t) = P^c(t) \cdot P^t(t) \cdot P^k(t) \quad (1)$$

де $P^t(t)$ – вірогідність безвідмовної роботи калібрувальної трубки;

$P^c(t)$ – вірогідність безвідмовної роботи сопла;

$P^k(t)$ – вірогідність безвідмовної роботи змішувальної камери.

Проаналізуємо сутність явищ, виникаючих при реалізації процесу гідро абразивного різання, які ведуть до припинення його нормального і сталого протікання.

Використовуване сопло виготовлене із надтвердого квазікрихкого матеріалу, і може вийти з ладу як внаслідок прояву зношувальних явищ, так і раптово, коли гідродинамічне навантаження або випадковий механічний вплив від дії частинок бруду в досопловому просторі призведе до появи критичних напружень, внаслідок чого початкові дефекти матеріалу сопла стають центрами розвитку мікротріщин.

З теорії руйнування квазікрихких матеріалів відомо, що швидкість зростання берегів тріщини може сягати 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.

Отже, прояв як поступових $(1 - P_n^c)$, так і раптових $(1 - P_p^c)$ відмов як незалежних подій дозволяє ймовірність безвідмовної роботи визначити так:

$$P_c(t) = P_n^c(t) P_p^c(t) \quad (2)$$

Калібрувальна трубка сприймає гідродинамічне та механічне навантаження від дії швидкорухомих частинок абразиву, які вводяться у потік рідини за зрізом сопла. Її виготовлено із твердого сплаву, із забезпеченням вимог щодо точності взаємного розташування базових поверхонь та виконання відповідних розмірів. Причина виходу із ладу калібрувальної трубки – зростання калібрувального отвору D_k

понад встановлений граничний розмір та сколювання окремих елементів, внаслідок чого змінюється геометрія сформованої канавки різку. Це пошкодження обумовлене зношувальними явищами, однак на відміну від сопла початкові дефекти не призводять до миттєвого виходу з ладу, і трубка певний час ще працює. У цьому випадку відмова цього елемента є складною подією, яка описується виразом

$$F_t(t) = (1 - P_n^t(t))(1 - P_p^t(t)) \quad (3)$$

А безвідмовність, відповідно до $P^t = 1 - F^t$, визначиться:

$$P_t(t) = [1 - (1 - P_n^t(t))(1 - P_p^t(t))] \quad (4)$$

Тепер на основі (1) загальна безвідмовність роботи системи становитиме:

$$P_t(t) = P_n^c(t) P_p^c(t) [1 - (1 - P_n^t(t))(1 - P_p^t(t))] P_p^k(t) \quad (5)$$

З урахуванням того, що прояв поступових відмов є наслідком протікання процесів зношування ймовірність безвідмовної роботи визначиться як

$$P_1(t) = 0,5 + \Phi \left(\frac{X_{\max 1} - a_{01} - \gamma_{cp1} t}{\sqrt{\sigma_{a1}^2 + \sigma_{\gamma 1}^2 t^2}} \right) \text{ а настання випад-}$$

кових відмов підкоряється експоненціальному закону $P_p(t) = e^{-\lambda t}$ стосовно сопла можемо записати:

$$P_n^c(t) = \left[0,5 + \Phi \left(\frac{d_{c \max} - \bar{d}_c - \gamma_c t}{\sqrt{\sigma_{dc}^2 + \sigma_{\gamma c}^2 t^2}} \right) \right] e^{-\lambda_d t} \quad (6)$$

Для калібрувальної трубки вираз набуде вигляду:

$$P_t(t) = \left\{ 1 - \left[0,5 - \Phi \left(\frac{D_{k \max} - \bar{D}_k - \gamma_{Dk} t}{\sqrt{\sigma_{Dk}^2 + \sigma_{\gamma Dk}^2 t^2}} \right) \right] \left[1 - e^{-\lambda_D t} \right] \right\} \quad (7)$$

Нарешті, із урахуванням надійності подачі абразиву $P^z(t)$ матимемо:

$$P(t) = \left[0,5 + \Phi \left(\frac{d_{c \max} - \bar{d}_c - \gamma_c t}{\sqrt{\sigma_{dc}^2 + \sigma_{\gamma dc}^2 t^2}} \right) \right] \cdot \left\{ 1 - \left[0,5 - \Phi \left(\frac{D_{k \max} - \bar{D}_k - \gamma_{Dk} t}{\sqrt{\sigma_{Dk}^2 + \sigma_{\gamma Dk}^2 t^2}} \right) \right] \left[1 - e^{-\lambda_D t} \right] \right\} \cdot e^{-\lambda_d t} P^z(t) \quad (8)$$

де $d_{c \max}$, $D_{k \max}$ – максимальний діаметр сопла та калібрувальної трубки;

\bar{d}_c , \bar{D}_k – середній діаметр сопла та калібрувальної трубки;

γ_c , γ_{Dk} – швидкість збільшення діаметра сопла калібрувальної трубки;

σ_{dc}^2 , σ_{Dk}^2 – дисперсія розсіювання початкових діаметрів сопла та калібрувальної трубки;

$\sigma_{\gamma dc}$, $\sigma_{\gamma Dk}$ – дисперсія розсіювання швидкості зростання сопла та калібрувальної трубки;

λ_d , λ_D – потік раптових відмов сопла та калібрувальної трубки.

Явища зношування сопла і отвору калібрувальної трубки у загальному вигляді є незалежними. Як вже зазначалося, вони мають різну інтенсивність, отже, досягнення критичного рівня кожного із параметрів (d_c та D_k) буде відбуватися у різні моменти часу (див рис.3). Іншими словами, причиною настання відмови внаслідок повільнопротікаючих процесів буде зазвичай одна із подій. Таким чином, закон розподілу ймовірності настання параметричної відмови $P(t)$ за показником h_m буде безпосередньо визначатися ймовірністю прояву значення d_c або D_k , що перевищили критичний рівень своїх значень. Те саме можна сказати і про допуск на ширину різання T_b , який визначається як $T_b = b_{nom} - b_{max}$.

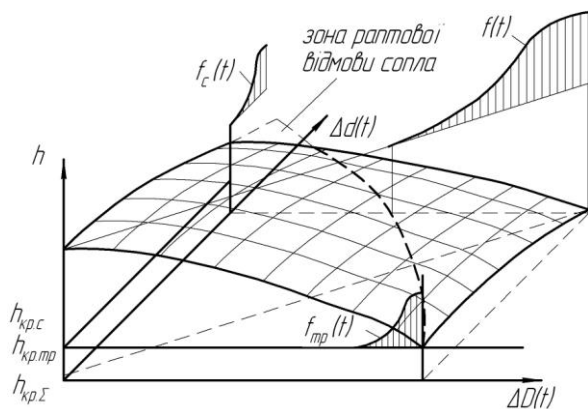


Рисунок 3 – Межі змін ΔD_k та Δd_c і ймовірність виникнення відмови системи

Серед ряду параметрів технологічної системи, що визначають умови протікання процесу гідроабразивного різання, і забезпечують, власне, його сталість, геометричні параметри струменеформуючої системи є незалежними та практично не пов'язаними один із одним. Тиск технологічної рідини p_b у досопловому просторі залежатиме від діаметра отвору сопла d_c , а швидкість робочої подачі s_k , може коригуватися відповідними алгоритмами системи ЧПК.

Тоді задача прогнозування надійності процесу гідроабразивного різання впливатиме із умови

$$\begin{cases} h_m k_q < h_t = f(D_k, d_c); \\ b_{max} > b_i = f(D_k, d_c) \end{cases} \quad (9)$$

де праві частини рівнянь – значення h_t та b_i у функції d_c та D_k , отримані при розрахункових значеннях швидкості робочої подачі s_k та оптимальній витраті абразиву і його дисперсності, k_q – коефіцієнт якості, що обумовлює перевищення розрахункового значення h_p над товщиною матеріалу h_m .

Використання пакету Flowvision дозволило визначити зміну осевого динамічного тиску p_i у функції часу t (рис. 4 та 5). Так, встановлено, що залежно від напрямку та швидкості s_p відносного руху подачі, механізму руйнування матеріалу та утворюваних при цьому сходинок різання, на крайці калібрувальної трубки можливі випадки виникнення ударних гідродинамічних явищ, обумовлених хвильовими процесами у самому струмені в момент натікання його на перепону.

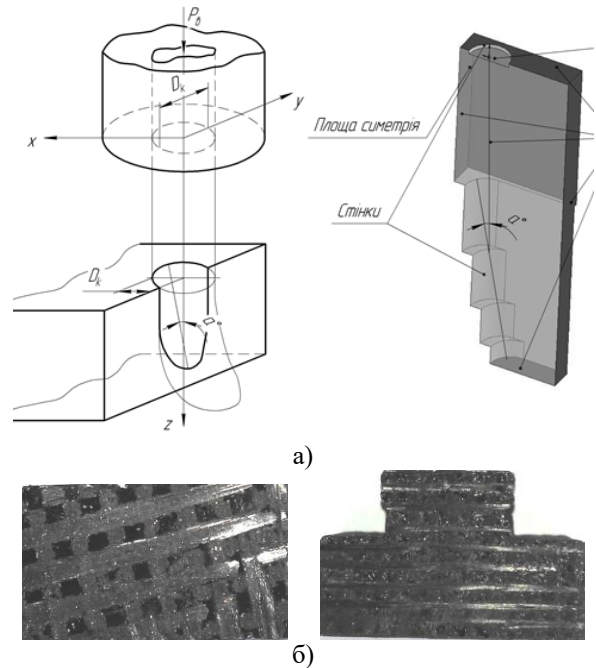


Рисунок 4 – Розрахункова схема (а) та фотографії структури і контурного різання карбон-карбонowego композиту (б) (параметри $d_c=1,1\text{мм}$; $P_b=300\text{МПа}$; $h_c=4\text{мм}$)

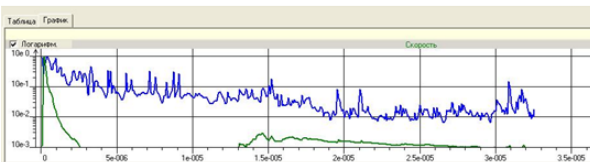
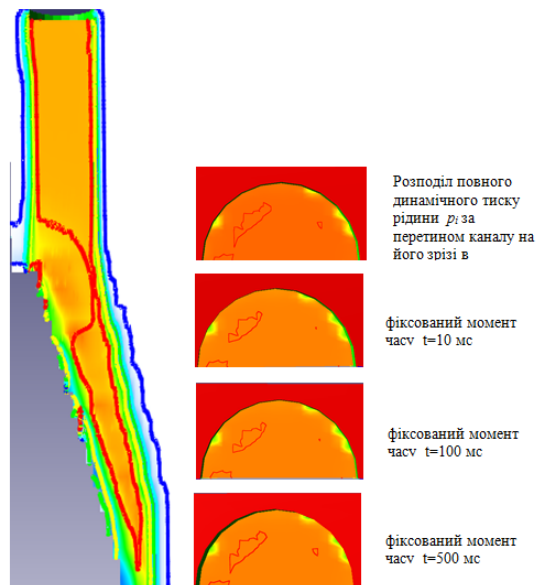


Рисунок 5 – Розрахункова модель різання композитного матеріалу зі ступінчатою структурою борозенки різання з кроком $h=0,1\text{мм}$ та кутом стікання $\pi/12$ рад

Ці явища викликають короткочасне (тривалістю не більше $T_n=0,1\text{с}$) навантаження окремих ділянок крайки з середнім рівнем тиску $p_n=40...50\text{МПа}$ (рис. 6), причому ділянки такого навантаження роз-

ташовані на протилежній від фронту гідро різання частині крайки, їх площа становить $0,005...0,01 F_{Dk}$.

З поданих графіків видно, що зміна динамічного тиску більша на частині крайки, протилежній напрямку руху струменя, отже, виходячи з того, що кут нахилу фронту гідрорізання не перевищує $\pi/12 \dots \pi/18$, цей тиск може сягати 40-50 МПа. В зонах локальної зміни тиску виникатиме зміна напрямку руху абразивних частинок.

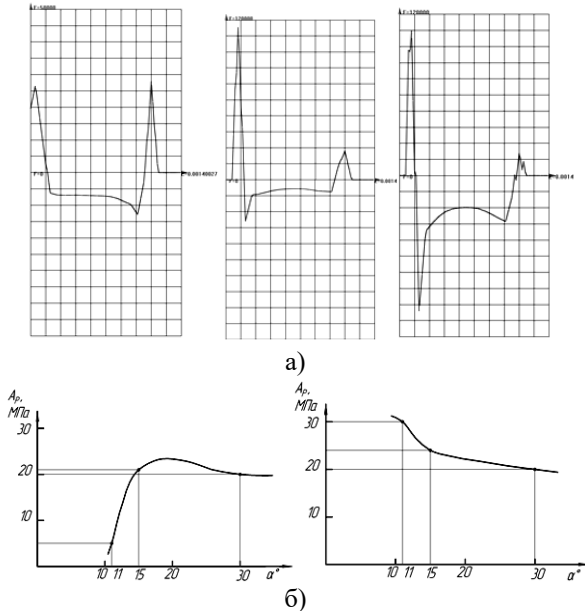


Рисунок 6 – Епюри розподілу динамічного тиску на крайці калібрувальної трубки за усім перетином (а) та залежність тиску від кута нахилу фронту борозенки різа (б) у критичних точках калібрувальної трубки (зліва – частина від борозенки різа, справа – протилежна частина)

Тоді, прийнявши припущення, що у зонах рівномірного тиску вектор швидкості руху частинок співпадає з віссю струменя, а у зонах змін тиску частинки змінюють напрям і набігають на внутрішню поверхню під певними кутами, що веде до нерівномірного зносу каналу, а на торці крайки калібрувальної трубки.

Насправді, поява зон локальної зміни тиску веде до виникнення на рухомих частинках абразиву додаткового навантаження, направлено до стінки калібрувальної трубки. Оскільки на частину діє сила

$P = \Delta p_d \frac{\pi D_a^2}{4}$, частинка починає рухатися рівноприскорено до стінки, набуваючи на шляху r_a швидкості

v_r , що дорівнює $v_r = D \sqrt{\frac{\pi \Delta p}{2m}} r_a$. Визначивши у такий спосіб тангенціальну (направлену до стінки) та нормальну (за балансом енергії потоку) швидкість руху частинок, побудували діаграму зношування крайки калібрувальної трубки, подану на рис. 7.

Аналіз діаграми дозволяє зробити такі висновки: відхилення від круглості отриманого перетину крайки калібрувальної трубки задовільно описуєть-

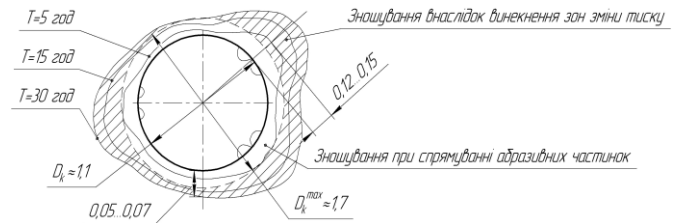


Рисунок 7 – Моделювання зношування торця калібрувальної трубки (виникнення відхилення від круглості)

ся рядом Фур'є з трьома значущими гармоніками; зміна умов натікання струменя на перепону змінює орієнтацію променів відхилень, які функціонально пов'язані із орієнтацію відхилення струменя площинкою струминної ерозії; більші відхилення, обумовлені більшим перепадом тиску, властиві умовам натікання струменя на перепону під більшими кутами.

ВИСНОВКИ. Таким чином, створена модель надійності гідроабразивного різання в якій враховані вплив нерівномірного зношування крайки калібрувальної трубки, що є результатом обробки шаруватих композитних матеріалів.

Запропоновано для зменшення нерівномірності зношування і, відповідно, стабілізація процесу гідроабразивного різання постійно змінюючи положення трубки шляхом її обертання довкола вертикальної осі.

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. Дудюк В.О. Підвищення надійності процесу гідроабразивного різання за рахунок засобів активного контролю лазерним променем // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.* – Вип. 1/2015(90). Частина 2. – Кременчук: КрНУ, 2015. – С. 27–32.
4. О механике струйного разрушения тонколистовых изделий из неметаллических композитов / А.Ф. Саленко, В.Г. Доценко, А.Н. Мана, Е.В. Фомаевская // *Технология и техника автоматизации: Сб. научных трудов международной конференции.* – Ереван, 2008. – С. 248–256.
5. Salenko A., Fomovskaya A. Some aspects of composite materials hydro jetting from the point of the Linear Mechanic Destruction // *Journal of the Technical University of Gabrovo.* – Vol. 6, 2008. – P. 23–33.
6. О возможности гидроабразивной прошивки отверстий в заготовках из функциональных материалов / А.Ф. Саленко, А.Н. Мана, В.С. Петропольский и др. // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: збір. наук. праць.* – Краматорськ, 2011. – Вип. 29. – С. 107–118.

7. Мана О.М. Запобігання деструкції композитних матеріалів при виконанні операцій струминно-абразивного прошивання малих отворів // Промислова гідравліка і пневматика. Всеукраїнський науково-технічний журнал. – Вінниця, 2012. – Вип. 3 (37). – С. 45–56.

8. Salenko O.F., Schetinin V.T., Fedotiev A.N., Dudyuk V.A., Klimenko S.A., Borsmsky A.I., Sorochenko T.A. Methods of Cutting for Workpieces of Hardmetal and CBN-based Polycrystalline Superhard Materials // Journal of Superhard Materials. – 2015. – Vol. 37, No. 4. – pp. 271–281.

9. Klymenko S., Salenko A., Burykin V., Ryzhov Yu., Fedot'ev A. Formation of the surface layer in the waterjet cutting of working tool surface of cubic boron nitride // Superhard Materials. – 2011. – No. 5, pp. 120–128.

10. Hashish M. The water jet as a tool: 14th International Conference on Jetting Technology. Brugge, Belgium, 21-23 September. BHR Group Conference Series. Publication. – 1998. – JV° 32. – P. 1–14.

PECULIARITIES OF REABILITY MODEL OF HYDRO ABRASIVE CUTTING FOR MODERN COMPOSITE MATERIALS

V. Dudyuk

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

P. Mel'nichuk

Zhytomyr State Technological University
vul. Chernyakhovsky, 103, Zhytomyr, 10005, Ukraine.

Purpose. Creation of a mathematical model to determine the reliability of waterjet cutting taking into account the influence of the technological and physico-technical characteristics of the processing material. **Methodology.** The theory of reliability of complex technical systems, the theory of fracture of composite materials were used for the mathematical modeling. In order to analyze the results, theoretical foundations of hydraulics and hydrodynamics were used. **Results.** The composition of mathematical models and their parameters were determined. It is established the influence of different types of cracks on the process and quality of cutting composite materials; also modelling using the software package FlowVision was conducted. It is established that the process parameters and physico-technical properties of the material affect the degree of wear of elements of waterjet cutting. **Originality** For the first time the influence of fracture of layered composite material and hydrodynamic effects of processing on the reliability models of waterjet cutting were considered. **Practical value.** Based on the data obtained, to improve the reliability and stability abrasive waterjet cutting was proposed to turn the calibration tube around its axis for projected changes in the diameter of the hole. References 10, figures 7.

Key words: mathematical model, abrasive waterjet cutting, reliability, refusal, waterjet forming elements, composite materials.

REFERENCES

1. Salenko, A.F., and Dudyuk, V.A. (2010) "Reliability jet cutting process (beginning)", *Metalloobrabotka. Mezhdunarodnyiy informatsionno-tehnicheskii zhurnal. Oborudovanie i instrument dlya professionalov*, no. 5, pp. 22–26.

2. Salenko, A.F., and Dudyuk, V.A. (2010), "Reliability jet cutting process (continued)", *Metalloobrabotka. Mezhdunarodnyiy informatsionno-tehnicheskii zhurnal. Oborudovanie i instrument dlya professionalov*, no. 6, pp. 22–23.

3. Dudyuk, V.O. (2015) "Increase of reability of the hydroabrasive cutting process by laser beam at the expense of means of active control", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Vol. 1(90), Part 1, pp. 27–32.

4. Salenko, A.F., Dotsenko, V.G., Mana, A.N., and Fomovskaya, E.V. (2008) "About the mechanics of waterjet destruction of sheet products of non-metallic composite materials", *Tekhnologiya i tekhnika avtomatizatsii: Sb. nauchnykh trudov mezhdunarodnoy konferentsii*, pp. 248–256.

5. Salenko, A. and Fomovskaya, A. (2008) "Some aspects of composite materials hydro jetting from the point of the Linear Mechanic Destruction" *Journal of the Technical University of Gabrovo.* – vol. 6, pp. 23–33.

6. Salenko, A.F., Mana, A.N., Petropolsky, V.S., Starikova, M.V., and Andreev A.V. (2011) "About possibility of a hydroabrasive insertion of apertures in preparations from functional materials" *Reliability of the tool and optimisation of technological systems*. no. 29, pp. 107–118.

7. Mana, O.M. (2012), "Prevention of destruction of composite materials when performing operations abrasive waterjet microcutting of small holes", *Promyslova gidravlika i pnevmatyka. Vseukrayinskyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal*, vol. 3 (37), pp. 45–56.

8. Salenko, O.F., Schetinin, V.T., Fedotiev, A.N., Dudyuk, V.A., Klimenko, S.A., Borsmsky, A.I., and Sorochenko, T.A. (2015) "Methods of Cutting for Workpieces of Hardmetal and CBN-based Polycrystalline Superhard Materials" *Journal of Superhard Materials*. Vol. 37, no. 4, pp. 271–281.

9. Klymenko, S., Salenko, A., Burykin, V., Ryzhov, Yu. and Fedot'ev, A. (2011) "Formation of the surface layer in the waterjet cutting of working tool surface of cubic boron nitride" *Journal Superhard Materials*, no. 5, pp. 120–128.

10. Hashish, M. (1998) "The water jet as a tool" *14th International Conference on Jetting Technology. Brugge, Belgium, 21-23 September*. BHR Group Conference Series. Publication, – JV° 32, pp. 1–14.

Стаття надійшла 19.09.2016.