

ЗНИЖЕННЯ ХВИЛЯСТОСТІ ТА ШОРСТКОСТІ КРАЙКИ ЗАГОТОВКИ ВІД ДІЇ ШВИДКОПЛИННОГО СТРУМЕНЯ У ГІДРОРІЗНИХ СИСТЕМАХ ІЗ РУХОМОЮ ЗАГОТОВКОЮ

С. В. Коваленко

Кропивницький інженерний коледж Центральноукраїнського національного технічного університету
вул. Юрія Олефіренка, 6, м. Кропивницький, 25000, Україна.

С. П. Мельничук, В. М. Орел, О. Ф. Саленко, В. Т. Щетинин

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: salenko2006@ukr.net

Використання струминних потоків для формоутворення та зміни стану поверхневих шарів знаходить все більше поширення в інженерній практиці. Однак при обробці високоточних виробів, що потребують стабільної якості торців, такі системи практично мало прийнятні, оскільки періодичне натікання струменя на опори столу викликає зміну умов взаємодії та виникнення дефектів обробки. Пропонується застосовувати системи із нерухомою струминною головкою, а робочі переміщення здійснювати за рахунок руху заготовки. В роботі проаналізовано умови виникнення коливань та встановлено закономірності формування дефектів крайки, які можна ослабити шляхом забезпечення змінної швидкості контурної подачі, а також відповідним демпфуванням ланок системи приводу заготовки. Показано, що формування хвилястості крайки при контурному різанні відбувається у початковий момент контакту струменя із заготовкою та в моменти зміни напрямку переміщення заготовки. Надання залежної подачі рухомому робочому органу дозволяє зменшити коливальні явища, покращити якість крайки. Запропонована математична модель, що враховує динаміку заготовки під дією гідродинамічного ударного навантаження, динаміку приводів подач та явища від високочастотного впливу частинок абразиву. Оцінку якості перехідних процесів запропоновано здійснювати на основі імітаційної моделі гідроабразивного різання.

Ключові слова: гідроабразивне різання, компонування, потік, неметали, фізико-технічні методи обробки.

СНИЖЕНИЕ ВОЛНИСТОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ КРОМКИ ЗАГОТОВКИ ОТ ДЕЙСТВИЯ СКОРОСТНОЙ СТРУИ В ГИДРОРЕЗНЫХ СИСТЕМАХ С ПОДВИЖНОЙ ЗАГОТОВКОЙ

С. В. Коваленко

Кропивницький інженерний коледж Центрально українського національного технічного університету
ул. Юрия Олефиренка, 6, г. Кропивницкий, 25000, Украина.

С. П. Мельничук, В. Н. Орел, А. Ф. Саленко, В. Т. Щетинин

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: salenko2006@ukr.net

Использование струйных потоков для формообразования и изменения состояния поверхности получает все большее распространение в инженерной практике. Однако при обработке высокоточных изделий, требующих стабильного качества торцев, такие системы малопригодны, так как периодическое натекания струи на опоры стола вызывают изменение условий взаимодействия и приводят к дефектам обработки. Предлагается применять системы с неподвижной струйной головкой, а рабочие перемещения совершать за счет движения заготовки. В работе проанализированы условия возникновения колебаний, установлены закономерности формирования дефектов торца, которые можно нивелировать путем обеспечения переменной скорости контурной подачи с соответствующим демпфированием звеньев системы привода заготовки. Показано, что формирование волнистости торца при контурной резке происходит в начальный момент контакта струи с заготовкой и в момент изменения направления движения заготовки. Сообщение зависимой подачи движущемуся рабочему органу позволяет уменьшить колебательные явления, улучшить качество торца. Предложена математическая модель, учитывающая динамику заготовки под действием гидродинамической ударной нагрузки, динамику приводов подач и явления высокочастотного влияния частиц абразива. Оценку качества переходных процессов предложено осуществлять на основе имитационной модели гидроабразивного резания.

Ключевые слова: гидроабразивное резание, компоновка, поток, неметаллы, физико-технические методы обработки.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Фізико-технічні методи обробки матеріалів, перш за все, неметалевих, засновані на використанні енергії швидкоплинних потоків речовини, знаходять усе більше поширення в інженерній практиці. Гідрорізні системи, оснащені однією або кількома струминними пристроями (у переважній більшості випадків, струминно-абразивними засобами), пропонуються на ринку значною кількістю виробників. При цьому, незважаючи на наявність додаткових програмних або

технічних засобів, технологічних пристроїв, які розширюють можливості обладнання, практично всі моделі виконані за однією компонувальною схемою (формула компоновки за [1] – $Z_{xy}OXYZP_z$), при якій нерухома листова заготовка розташована на поверхні ножового столу, який одночасно є і уловлювачем – гідродинамічним гасником струминного потоку, а гідрорізна головка переміщується над заготовкою за допомогою порталного або портално-консольного механізму.

Прості гідrorізні системи дозволяють забезпечити планарне контурне переміщення головки, внаслідок чого з'являється можливість виконувати криволінійне різання листових заготовок незначної товщини; більш дорогі системи мають додатково програму контрольовану вертикальну координату. Найбільш складні системи додатково мають засоби компенсації відхилення струменя, елементи контролю товщини оброблюваної заготовки, засоби адаптивного регулювання тиску в гідросистемі.

Однак на усіх зазначених видах обладнання рух контурної подачі здійснює саме гідроструминна головка, що при нерухомо розташованій на опорних ножах заготовці призводить до того, що на крайці різі виникає дефект у вигляді певного спотворення контуру; нижня площина заготовки також піддається гідродинамічному впливу від хвильових явищ, обумовлених натіканням струменя на водну поверхню уловлювача.

Пошук шляхів подолання зазначених недоліків дозволив запропонувати принципове нове технічне рішення [2–3], використання якого нівелює негативну дію струменя. В пропонуваній системі ($3_{xy}XYZOP_z$) заготовка розташовується на нерухомому столі із елементами розвантаження ваги заготовки та сполучається із важільною системою (наприклад, паралелограмного типу), яка забезпечує рух контурної подачі. При цьому замість басейну-уловлювача застосовується профільоване приймальне сопло (конфузорно-дифузорного типу), сполучене із камерою рециркуляції рідини та сепарації відпрацьованого абразивного матеріалу. Однак на сьогодні відомості щодо раціональних умов ведення обробки за умови рухомої заготовки та нерухомого струменя практично відсутні, що робить дослідження у даній галузі актуальними та значимими.

Мета роботи – зниження хвилястості та шорсткості крайки заготовки на обладнанні із важільною системою робочої подачі рухомої заготовки.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Для розв'язання поставленої задачі скористалися методами імітаційного моделювання із використанням засобів операторного числення; моделювання умов течії рідини здійснювали на основі фундаментальних положень технічної гідро-механіки та рівнянь Нав'є-Стокса, рух заготовки визначали на основі динамічного аналізу важільної системи кінцевої пружності із використанням принципу Даламбера; руйнування заготовки під дією швидкоплинного потоку рідини встановлювали на основі закономірностей та фундаментальних положень лінійної механіки руйнування квазі-пружних тіл. Для перевірки основних теоретичних посилок та ідентифікації динамічних моделей скористалися наявним обладнанням: лазерно-струминним комплексом ЛСК-400-5 із п'ятикоординатною системою керування, з установленим оригінальним технологічним оснащенням, що імітує роботу важільної системи контурної подачі; визначення окремих параметрів виконували шляхом виміру в режимі on-line переміщень, тисків та деформацій ланок технологічної системи із використанням аналогово-цифрового перетворювача m-Daq.

Із раніше приведених публікацій [4–5] відомо, що пропонуване компонування має значні переваги перед нині існуючим компонуванням верстатів типу із столом, встановленим над басейном приймачем.

Обмеженість використання пропонуваної системи очевидно пояснюється тим, що розкрийні операції мають враховувати особливості переміщення саме заготовки, тобто умови її повного відокремлення при прорізанні заданого контуру, які мають враховуватися програмним забезпеченням і оператором при виконанні обробки. З іншого боку, розкрий кількох деталей із однієї заготовки вимагає періодичного видалення відокремлених деталей із зони обробки, а також наявності підтримуючого столу із розвантажуючими елементами [6].

З цієї точки зору обладнання традиційного компонування є більш технологічним, хоча і за певних умов отримати високу якість крайок на такому обладнанні практично неможливо [7]. Однак для ряду задач, наприклад, виготовлення зразків під механічні випробування, будь-які дефекти на робочих поверхнях неприпустимі, отже, вирізання плоских зразків на даному обладнанні є найбільш перспективним.

Для розв'язання задачі пошуку раціональних параметрів та умов виконання обробки скористалися імітаційною моделлю процесу взаємодії швидкоплинного двофазного струменя із оброблюваною заготовкою, що знаходиться на робочому столі верстата.

Розглянуто такі випадки: 1) заготовка нерухомо розташована на столі, над рідиною; хвилегасники відсутні, рух подачі здійснює струминна головка із засобами маніпулювання порталного типу; 2) заготовка покочується на столі, рухається за допомогою важільної системи, а струминна головка залишається нерухомою (рис. 1).

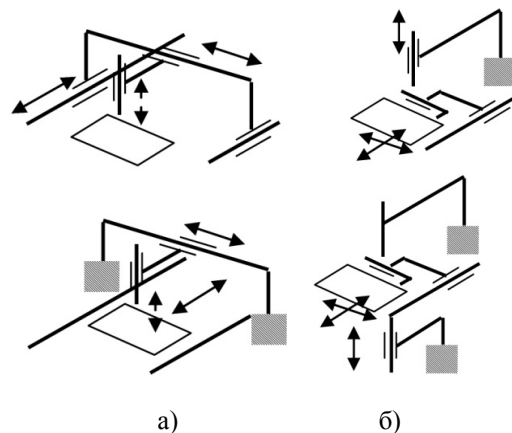


Рисунок 1 – Схеми взаємодії струменя із оброблюваною заготовкою на верстаті традиційного ($3_{xy}OXYZP_z$, $3_{xy}XOY P_z(z)$) компонування (а) та пропонуваного $3_{xy}XYZOP_z$, $3_{xy}XYOP_zZ$, (б)

З публікацій [8–9] відомо, що ерозія матеріалу визначається енергетичними параметрами струменя (його структурою, насиченістю абразивними домішками, віддаленістю від ядра, розподілом мас за перетином струменя та ін.), властивостям матеріалу та

його структурою, типом та схемою взаємодії. Оскільки максимальна ерозія спостерігається у зоні безпосереднього впливу, на поверхні, де дія струменя максимально локалізована, поліпшення ефективності та якості обробки дослідники вбачають у створенні певних умов для максимально повного використання енергії струменя (рис. 1).

Однак при дослідженні особливостей розкרוу тестових зразків для механічних випробувань із карбон-карбонівих матеріалів було встановлено [10], що ерозії піддається також і площина, зворотна від поверхні натікання струменя, внаслідок чого на поверхні заготовки виникає ряд дефектів (рис. 2).

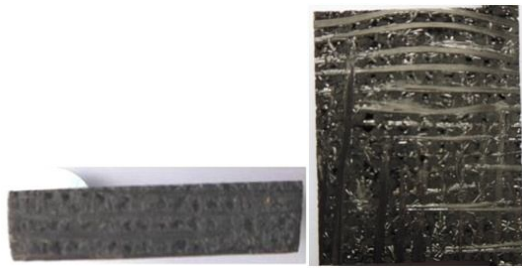


Рисунок 2 – Дефекти, що виникають при прецизійному гідро абразивному різанні карбонівих зразків на площині натікання (а), на торці (б) та на опорній площині

Зазначені дефекти є наслідками хвильових явищ у басейні, що виникають в момент натікання струменя на перепону, а також коливальних процесів у самому струмені, внаслідок формування на заготовці фронту гідрорізання з утворенням елементарних площинок руйнування [11]. Тож вихідні показники якості є результатом процесів ерозії, які відбуваються в зоні різання та на опорній площині заготовки (від зворотної дії струменя).

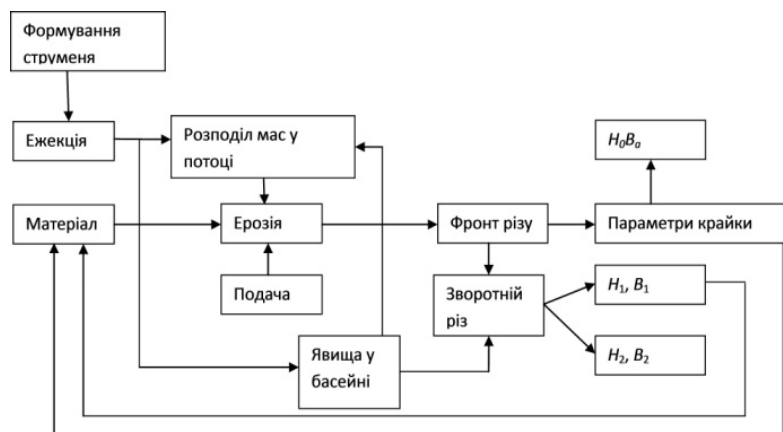


Рисунок 4 – Структурна схема процесу гідро абразивного різання із урахуванням явищ у басейні

Явища у гідросистемі та у камері змішування.

Потрапляючи від магістралі високого тиску до сопла, рідина витікає з нього зі швидкістю

Позначимо поверхні, які контролюються, як H_0B_0 – відповідно опорна та верхня поверхні пласкої заготовки (рис. 3); H_1, B_1 – поверхні на лівому торці заготовки; H_2, B_2 – поверхні на правому торці. Тоді структурну схему формування вихідних показників якості, що контролюються на відповідних поверхнях, можна подати відповідно до рис. 4. Утворення початкового отвору в заготовці без надання останній руху подач детально розглядалось нами в [12]. Різання з контурною подачею наведене у роботах [13–15], причому в [16] автори проаналізували формування борозенки різа. Однак у всіх цих роботах враховується тільки ефект прямої дії струменя, а хвильові процеси та явища коливального характеру, що виникають у струмені, не враховуються.

Формування краєк на оброблюваній заготовці визначається рядом процесів – ежекції та змішування зерен у сопловому пристрої, розподілу зерен за перетином струменя, натікання струменя на поверхню обробки, дії зворотного потоку, хвильових явищ у струмені, явищ деструкції самого матеріалу, явищ у басейні, коливань робочих органів.

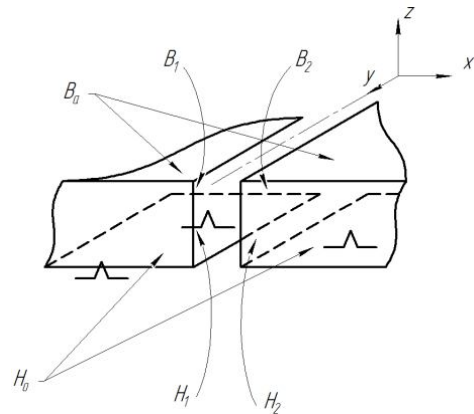


Рисунок 3 – Контроль дефектів крайки при гідроабразивному різанні

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2n}{n-1} \frac{b}{\rho_{bo}} \left(\left[\frac{\rho_{b\max}}{b} + 1 \right]^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)}, \quad (1)$$

де ρ_{bo} – густина технологічної рідини при атмосферному тиску; ρ_{bmax} – густина рідини при тиску у системі; b – ентропійна функція; n – показник адиабати.

Обсяг абразивних зерен, що потрапляють до камери змішування, визначається розрідженням середовища, яке відповідно до рівняння Менделєєва-Клапейрона, визначається швидкістю руху струменя у камері змішування, геометричними параметрами елементів ежектора (рис. 5). Для певного співвідношення обсягів каналу подачі робочого середовища W_j та змішувальної камери W_k за умови ізотермічності процесу $p_k = C_p \frac{p_0 W_j}{W_k}$, p_0 – тиск у середовищі за зрізом сопла.

Перепад тиску $\Delta p = f(v_c) = p_k(v_c) - p_a$ під дією якого рухається повітряно-абразивна суміш на довжині трубопроводу підведення абразиву l , становить

$$\Delta p \cdot F \cdot \Delta t = [\varepsilon \cdot \rho_T + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_B] \cdot F \cdot v_{cm}^2 \cdot \Delta t,$$

де ρ_T, ρ_B – щільність твердих частинок і стисненого повітря відповідно; ε – об'ємна частка твердих частинок в аеросуміші; $(1 - \varepsilon)$ – об'ємна частка повітря в аеросуміші; $\varepsilon \cdot \rho_T + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_B = \rho$ – щільність двофазного потоку; v_{cm} – швидкість його руху, $v_{cm} = \sqrt{\frac{\Delta p}{[\varepsilon \cdot \rho_T + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_B]}}$ тобто масова витрата абразиву M_a становитиме:

$$M_a = v_{cm} F \rho_T \varepsilon = \sqrt{\frac{\Delta p}{[\varepsilon \cdot \rho_T + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_B]}} F \rho_T \varepsilon \quad (2)$$

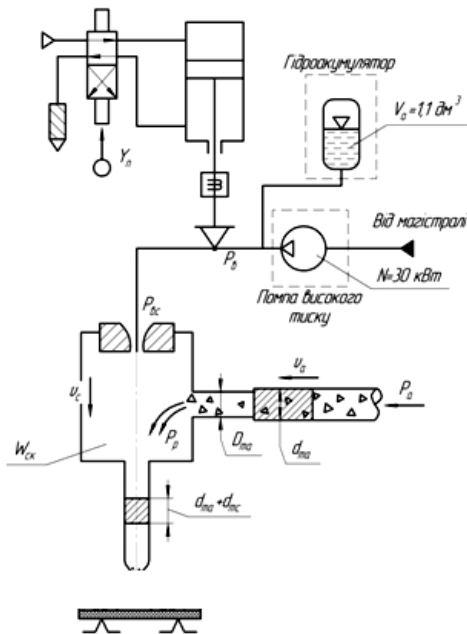


Рисунок 5 – Схема взаємодії струменя із заготовкою при переміщенні уздовж лінії обходу контуру

При цьому розподіл мас робочого середовища на поверхні впливу становить розподіл можна вважати таким, що відповідає закону нормального розподілення [17]:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{(x-a_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-a_y)^2}{2\sigma_y^2}} \quad (3)$$

де a_x, a_y – центри розсіювання (математичні сподівання) по осях ОХ та ОУ відповідно; σ_x, σ_y – середні квадратичні відхилення; x, y – плинні координати.

Скориставшись поняттям потоку маси, запропонованими авторами [18], маємо вирази для визначення кількості маси робочого середовища, яка потрапляє на оброблювану поверхню площею f за певний час t для випадку потрапляння на плоску нормально орієнтовану поверхню.

$$M_c = \int_0^t m \cdot f \cdot dt = \frac{f}{(x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} - y_i)} \int_0^t Q_m P(D(x, y)) dt$$

причому $P(D(x, y)) = \int_{x_i}^{x_{i+1}} \int_{y_i}^{y_{i+1}} f(x, y) dx dy$ – ймовірність

потрапляння частинки абразиву на ділянку площиною D .

Розподіл швидкостей потоку за перетином гідроабразивного струменя змінюється по довжині. З [19] відомо, що ефективний діаметр струменя у безрозмірному вигляді становитиме:

$$\frac{d_k}{d_n \sqrt{R}} = 0.335 \sqrt{\frac{X}{X_c}} \left[1 - \sqrt{\frac{\sigma_c X}{2P_1 X_c}} \right]^{2/3} \quad (4)$$

Це дає змогу визначити зниження швидкості руху елементарного обсягу струменя, знаючи усереднену швидкість при витіканні із змішувальної трубки. Зміна швидкості у функції віддалення від зрізу калібрувальної трубки опишеться виразом:

$$v_x = 0,335R \left(\frac{X}{X_c} \right) \left[1 - \sqrt{\frac{\sigma_c X}{2P_1 X_c}} \right]^4 \frac{2p_b f_k}{f_k \sqrt{2p_b \rho + Q_m}} \quad (5)$$

Поведінка матеріалу під дією зосередженої ударно-імпульсної сили.

В початковий момент часу оброблювана поверхня сприйматиме виключно гідродинамічне навантаження від перпендикулярно натікаючого потоку рідини, що зростає з плином часу:

$$R = \left[p_0(t) + \frac{\rho(v_0 \pm \varpi)^2}{2} \right] f_0 = \rho Q_0(t) v_0(t) = p_0(t) \frac{\pi D_k^2}{2} \left(1 - \frac{1}{100 \frac{\rho_m}{\rho} \left(\frac{v_{cmp}(t)}{v_0} \right)^2} \right) \quad (6)$$

де ρ_m, ρ – густина струменя і середовища відповідно.

Дія струминного навантаження, яке не перевищує межу міцності та межу текучості поверхневого шару – матриці, викликає в ній пружні деформації, які неважко визначити, розглядаючи напружений стан у безкінечно малому обсязі, що знаходиться у

зоні гідро впливу [20]. Зв'язок між напруженнями та деформаціями відображено залежностями:

$$\begin{cases} \sigma_r = 2G \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\mu \varepsilon}{1-2\mu} \right); \\ \sigma_t = 2G \left(\frac{U}{r} + \frac{\mu \varepsilon}{1-2\mu} \right); \\ \sigma_z = 2G \left(\frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\mu \varepsilon}{1-2\mu} \right); \\ \tau = G \left(\frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\partial H}{\partial r} \right). \end{cases} \quad (7)$$

де G – модуль зсуву твердого тіла; μ – його коефіцієнт Пуассона; ε – об'ємна деформація $\varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_t + \varepsilon_z = \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r} + \frac{\partial H}{\partial z}$. У цьому рівнянні U та H – складові переміщень певної точки, обраної у зоні струминного впливу, тобто там, де $p_b \neq 0$. Записавши диференціальне рівняння для U та H :

$$\begin{cases} (1-2\nu) \left(\Delta U - \frac{U}{r^2} \right) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = 0; \\ (1-2\nu) \Delta U + \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

де $\Delta = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{d}{rdr} + \frac{d^2}{dz^2}$ – оператор Лапласа, та визначивши об'ємну деформацію як:

$$\varepsilon = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)G} (\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z) = \frac{1-2\nu}{E} (\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z)$$

з умови задоволення рівнянню Лапласа:

$$\Delta \varepsilon = \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial r^2} + \frac{\partial \varepsilon}{r \partial r} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} = 0.$$

маємо наступні залежності для визначення U та H як функцій часу:

$$U(t) = \frac{(1-2\nu)p_o(t) \left(\frac{D_k}{2} \right)^2}{4G}, \quad 0 < \frac{D_i}{2} < \frac{D_k}{2}$$

$$H(t) = \frac{(1-2\nu)p_o(t) \left(\frac{D_k}{2} \right)^2}{G}$$

Ерозія на прямому та косому схилах

Руйнування матеріалу відбувається за деформаційним та ерозійним механізмами. Деформаційне мікроруйнування визначається так: рух частинки в перепоні (оброблюваному матеріалі) матиме вигляд:

$$m_a \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} C_x \rho_c S(h) v^2(t) - \sigma_{cc}(t) S(h) - F_{mp}(t, \varphi), \quad (9)$$

де m_a – плинне значення маси частинки абразиву при потраплянні на поверхню; $v(t)$ – плинне значення швидкості проникнення; C_x – коефіцієнт лобового опору частинки; $S(h, \varphi)$ – плинне значення проекції площі перетину частинки абразиву з урахуванням глибини проникнення у межах телесного кута $\Delta \varphi$, що визначиться так:

$$S(h, \varphi) = \pi R_a^2 \left[\frac{h(t)}{R(t, \varphi)} H(R-h) + H(h-R) \right] \quad (10)$$

де $h(t)$, R_a – функція глибини проникнення та плинного радіусу частинки $H(\dots)$ – функція Хевісайда [21].

Обсяг деформованого матеріалу становить $w_d = \pi h^2 \left(R - \frac{1}{3} h \right)$.

Поведінка матеріалу за рекомендацією [22] описується моделлю Максвелла для в'язкопружного тіла (рис. 6)

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{\mu}{G} (G\varepsilon - \sigma), \quad (11)$$

де G – модуль зсуву; μ – значення модуля динамічного коефіцієнта в'язкості для матеріалу; ε , σ – деформація та напруження у точці контакту.

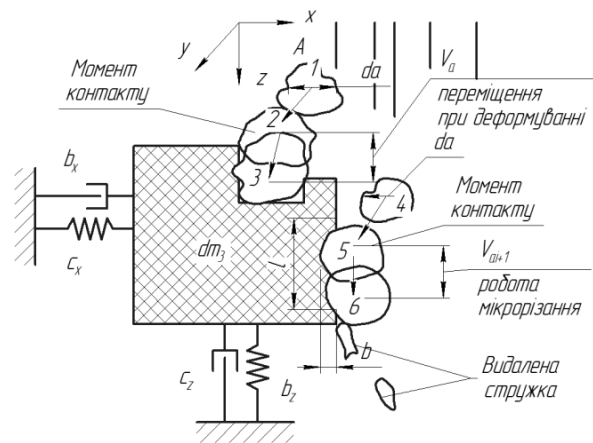


Рисунок 6 – Взаємодія частинки деформаційним та механізмом та мікрорізанням

Ефект мікрорізання (ерозійний механізм) проявляється у тому, що дія частинок на фронт борозенки різа може бути визначена за теоретико-емпіричними залежностями, запропонованими авторами [23]: глибина лунки δ_n та її довжина δ_a у функції параметрів процесу обробки визначиться рівняннями:

$$\delta_n = \frac{m v_n^2}{2} \frac{Ra}{k_n z_n HB};$$

$$\delta_a = \frac{m v_a^2}{2} \frac{z_n}{k_a \sigma_b Ra} - \frac{k_a T_p^2 \sigma_b Ra}{2 m z_n}$$

де m – маса абразивних частинок; v_n , v_a – нормальна та тангенційна складова швидкості удару частки з оброблюваною поверхнею; Ra , HB , σ_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.

Для кулькового сегменту обсяг $w_r = \frac{\pi x_n^2 (3R - x_n)}{3}$

R – радіус абразивної частинки, обсяг вилучення матеріалу за рахунок дії певної маси абразивних частинок за одиницю часу на основі поданого вище співвідношення становитиме:

$$w_l = \frac{M_a}{m} (w_r + w_d) \quad (12)$$

Коливальні явища в струмені. При натіканні на фронт борозенки різа струмінь, виконуючи роботу руйнування, як пружно-дисипативне середовище, проявляє пружні властивості, відхиляючись на певний кут відносно площини натікання. При цьому в струмені виникають хвильові явища, які призводять до розриву оболонки струменя (відповідно до [24]) та до виникнення коливань у вертикальній площині.

Оскільки струмінь, що витікає у повітряне середовище, проявляє пружно-дисипативні властивості, поведінку струменя можна описати аналогічно поведінці пружно-деформівного стрижня:

$$\varepsilon_z \frac{d}{dt} (z^{01} - z^{02}) - \left(m \frac{d^2 z^0}{dt^2} + h_z (z^{01} - z^{02}) \right) = \frac{\rho F \ddot{z} + E J_y z^{02} + H_z z + v_z \dot{z}}{\delta(x-vt)} ;$$

$$M_a^{max} \frac{d^2}{dt^2} z^{02} + h_z (z^{02} - z^{01}) + \varepsilon_z \frac{d}{dt} (z^{01} - z^{02}) , \quad (13)$$

де ε – коефіцієнт дисипації енергії; h_z – коефіцієнт пружності; m – маса струменя на ділянці між зрізом сопла та поверхнею обробки; M_a^{max} – маса пакету абразивних зерен, що прямує в струмені.

Різниця $(z^{02} - z^{01})$ визначає кут, на який можливе відхилення струменя у зоні ерозії. З іншого боку відхилення струменя відбуватиметься усялякий раз, коли струмінь натікає на перешкоду, яку за рахунок власної енергії зруйнувати не зможе. Такою перешкодою можуть бути опори столу гідрорізного верстата, а також окремі фракції оброблюваного матеріалу.

При натіканні на перешкоду відхилення струменя визначається рівнянням:

$$\alpha = \arctan \frac{a_1 - a_2 \sqrt{\frac{v}{v_0 \xi_{max}}}}{\frac{y_d}{\xi_{max}} - a_2 \tan \alpha \sqrt{\frac{v}{v_0 \xi_{max}}} - a_1 \tan \varepsilon_d}$$

де постійні $a_1 = \frac{\varepsilon_d \cos \varepsilon_d}{\pi + \varepsilon_d}$; $a_2 = \frac{\pi + 0,6 \varepsilon_d}{\pi + 2 \varepsilon_d} \frac{\sin \varepsilon_d}{\sqrt{(1 - \varepsilon_d / \pi) / 2}}$;

ε_d – кут фронту борозенки, який змінюється залежно від швидкості робочої подачі, міцності оброблюваного матеріалу, його структури, наявності неруйнової опори; v – кінетична в'язкість рідини; v_0 – швидкість струменя; ξ – координата, вимірювана уздовж фронту.

Оскільки кут відхилення α визначається прямунням точок рівного імпульсу, то в напрямку, паралельному площині стікання струменя $\alpha_i = \arctan \frac{P_{iz}}{J_{ix}}$; $P_{iz} = k_z y_i z_i P_z$. Враховуючи, що імпульс

i -тої точки становить $J_{ix} = J_0 / n$, а коефіцієнт $k_z = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n/2} y_i z_i}$, кут відхилення певної i -тої точки становитиме:

$$\alpha_i = \arctan \left[\frac{y_0 \xi_{max} \varepsilon_d (3\pi - \varepsilon_d) \cos \varepsilon_d \cdot \frac{n y_i z_i}{\sum_{i=1}^{n/2} y_i z_i}}{6\pi (\pi + \varepsilon_d)} \right]$$

Тоді сила, що діє на фронт борозенки, становить

$$P_z = \frac{\rho v_0^2 y_0 \xi_{max} \varepsilon_d (3\pi - \varepsilon_d) \cos \varepsilon_d}{6\pi (\pi + \varepsilon_d)} . \quad (14)$$

Хвильові явища у басейні та дія на заготовку. Хвильові явища у басейні є складними і багатоплановими. Струмінь, натікаючи на поверхню рідини, активно змішується із останньою, і викликає вихрові явища у зоні натікання. Сягнувши дна басейну, починає розтікатися і одночасно формує розтічну хвилю, яка поширюється вбік та вгору до вільної поверхні басейну. Якщо формалізований опис процесу змішування рідини є достатньо простим, і базується на положеннях щодо нерозривності потоку, то хвильові явища у басейні можуть бути визначені лише із певними припущеннями і обмеженнями.

Для опису параметрів течії в турбулентному струмені, використовуються рівняння, що в безрозмірному вигляді в циліндричних координатах, мають вигляд:

- рівняння нерозривності для суміші середовищ

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{1}{y^v} \frac{\partial (y^v \rho v)}{\partial y} = 0 ;$$

- рівняння кількості руху в проекції на вісь x

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \frac{1}{y^v} \frac{\partial}{\partial y} \left(y^v \mu_{ef} \frac{\partial u}{\partial y} \right) ;$$

- рівняння енергії

$$\rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho v \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \frac{1}{y^v} \frac{\partial}{\partial y} \left(y^v \left(\frac{\mu}{\text{Pr}} \right)_{ef} \frac{\partial H}{\partial y} \right) - \frac{1}{\text{Re}} \frac{1}{y^v} \frac{\partial}{\partial y} \times$$

$$\times \left[y^v \left(\left(\frac{\mu}{\text{Pr}} \right)_{ef} - \mu_{ef} \right) u \frac{\partial u}{\partial y} \right]$$

- рівняння дифузії для N_c компонентів суміші

$$\rho u \frac{\partial c_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial c_i}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \frac{1}{y^v} \frac{\partial}{\partial y} \left(y^v \left(\frac{\mu}{\text{Sc}} \right)_{ef} \frac{\partial c_i}{\partial y} \right)$$

$$(i = \overline{1, N_c - 1}), \quad \sum_{i=1}^{N_c} c_i = 1;$$

- рівняння переносу характеристик турбулентності, записане в узагальненому вигляді

$$\rho u \frac{\partial f_T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial f_T}{\partial y} = \frac{1}{y^v} \frac{\partial}{\partial y} \left[y^v A \frac{\partial f_T}{\partial y} \right] + S$$

де u, v – складові вектору швидкості вздовж координат x, y відповідно (координата x спрямована уздовж осі струменя, а координата y – перпендикулярно їй); ρ – щільність суміші; P – статичний тиск; c_i – масова концентрація i -ї компоненти суміші; $H = h + u^2 / 2$ – повна ентальпія суміші; h – питома статична ентальпія суміші; $\text{Re} = u_0 y_0 / (\mu_0 / \rho_0)$ – характерне число Рейнольдса, визначене в початковому перетині струменя; μ, μ_i – коефіцієнти динамічної молекулярної та турбулентної в'язкості відповідно:

$$\mu_{ef} = \mu + \mu_i, \quad \frac{\mu_{ef}}{\text{Pr}_{ef}} = \frac{\mu}{\text{Pr}} + \frac{\mu_i}{\text{Pr}_i}, \quad \frac{\mu_{ef}}{\text{Sm}_{ef}} = \frac{\mu}{\text{Sm}} + \frac{\mu_i}{\text{Sm}_i} ;$$

$Pr, Sm_i = \mu / \rho D_i, Pr_t, Sm_t, Pr_{ef}, Sm_{ef}$ – відповідно молекулярні, турбулентні та ефективні числа Прандтля й Шмідта; A – дифузійний коефіцієнт; S – член типу джерела; $\nu = 0$ для плоскої течії; $\nu = 1$ для вісесиметричної течії.

Деструкція матеріалу та вплив на явища у зоні обробки

Деструктивне руйнування прилеглої зони при початковому дефекті визначатиметься інтенсивністю контактних напружень на границі «матриця-армувальні волокна». Для окремого шару можна записати [25]:

$$Z_i \frac{d^4 W}{dy^4} = P(y) - q(y, t),$$

де $Z_i = \frac{E_y h_i}{12(1 - \mu^2)}$ – жорсткість поверхневого шару;

E_y – модуль пружності матриці; h_i – товщина шару матриці, що знаходиться з боку дії струменя; μ – коефіцієнт Пуассону; $P(y)$ – нормальні контактні напруження, що діють між шаром матриці та шаром армувальних волокон; $q(y, t)$ – навантаження, що виникає від дії гідродинамічного клину; $W(y)$ – прогин шару, що втратив адгезійне зчеплення з волокнами.

Розв'язуючи дану задачу за допомогою інтегральних перетворень Фур'є, автором [26] знайдено коефіцієнти інтенсивності напружень, виходячи з симетрії навантаження:

$$K_j^\pm = \frac{2Z_1}{\pi A} \sum_{m=0}^{\infty} \chi_m \frac{2^{2m+1} (2m+1)^2}{(-2)^{2m+2} m!},$$

A, B – коефіцієнти, що характеризують фізико-механічні властивості матеріалу; χ_m – коефіцієнти, що отримані при розв'язку рівняння

$$\chi_m (2m+1) - \sum_{n=0}^{\infty} \chi_n \frac{\sqrt{(2m+1)}}{\sqrt{2n+1}} d_{mn} = f_m,$$

а відповідні вирази для f_m та d_{mn} обчислені за рівняннями:

$$f_m = \frac{-P\pi(\partial 2m+2)^\infty}{Z_1 a^2 (2n)!} \int_0^\infty \frac{\sin \alpha a}{\alpha^2 (\gamma + \alpha^2)} J_{i+2m} \alpha da \alpha$$

$$d_{mn} = \frac{y\pi^2(\partial 2+2m)(\partial 2+2n)^\infty}{(2n)!(2m)!} \int_0^\infty \frac{\sin \alpha a}{\alpha^2 (\gamma + \alpha^2)} J_{i+2m} \alpha da \alpha$$

Скориставшись моделлю крихкої тріщини з кінцевою зоною Леонова-Панасюка [27]:

$$K = \sqrt{\frac{G(3m-1)}{m}} \sigma_0 \delta,$$

де σ_0 – питома сила зчеплення, що діє між берегами тріщини, можна визначити δ – критичну відстань між берегами тріщини – шаром армувальних волокон та матриці, при якій σ_0 перетворюється у нуль, а зважаючи на те, що

$$K = \sigma \sqrt{\pi a},$$

де σ – діючі напруження, довжини тріщини $2a$ (тобто ширина деструкції) у зоні струминного впливу визначиться максимально досяжним рівнем тиску P_{max}

$$2a = \frac{2K^2}{\sigma^2 \pi} = 2 \frac{\left[\frac{2Z_1}{\pi A} \sum_{m=0}^{\infty} \chi_m \frac{2^{2m+1} (2m+1)^2}{(-2)^{2m+2} m!} \right]^2}{\sigma^2 \pi}.$$

Оскільки виникаючі напруження за умови безкінечності пластини, що обробляється, змінюються за гармонійним законом, обумовленим схемою натікання струменя, запишемо:

$$2a(t) = 2 \frac{\left[\frac{2Z_1}{\pi A} \sum_{m=0}^{\infty} \chi_m \frac{2^{2m+1} (2m+1)^2}{(-2)^{2m+2} m!} \right]^2}{(P \cos(\omega t))^2 \pi}. \quad (15)$$

Динаміка приводу подач

Математичне моделювання поведінки важільно-го механізму, що здійснює рух подачі, подано на рис. 7.

До уваги прийняті такі припущення:

- зосереджені маси знаходяться у центрі ваги важеля 2, приведені до валів робочих двигунів J_1 та J_2 , а важіль 1 являє собою двомасову систему із центрами ваги, що знаходяться на рівних відстанях між точками А, В, С (оскільки важіль 1 є довшим та менш жорстким);

- важелі здійснюють поступальний або обертальний рух в малих переміщеннях, який обумовлюється положенням механізму, зокрема, кутом α_i та l_{2i} ;

- приведені жорсткості c_2 та c_3 визначаються як пружними властивостями саміх важелів, так і шарнірами; жорсткості крутильні c_1 та c_4 обумовлюються попереднім натягом зубчастої пари в кроковому двигуні;

- моменти тертя M_i у шарнірах однакові;
- коефіцієнти демпфування $b_2=b_3$ та визначається умовами сполучення елементів шарніру, зокрема, властивостями матеріалу шарніру та мікрогеометрією контактуючих поверхонь.

Для випадку, коли $\alpha_{min}, M_1, M_2, l_1 \approx l_2 \approx l_3$ поведінка механічної системи описуватиметься так:

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = \omega_1;$$

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{M(U)}{J_1} - \frac{k_1}{m_1} [c_1(x_1 - x_{01}) + b_1(v_1 - v_{01})] - \frac{M_{tp}}{J_m};$$

$$M(U) = M_{const} - \xi_1(\alpha_t - \alpha_0);$$

$$\frac{dv_1}{dt} = \frac{k_1}{m_1} [c_1(x_1 - x_{01}) + b_1(v_1 - v_{01})] - \frac{2M_{tp}}{J_m} - [c_2(x_2 - x_1) + b_1(v_2 - v_2)] - \frac{k_3}{m_3} [c_3(x_3 - x_{03}) + b_3(v_3 - v_{03})]$$

$$\frac{d\varphi_3}{dt} = \omega_3;$$

$$\frac{d\omega_3}{dt} = \frac{M(U)}{J_3} - \frac{k_3}{m_3} [c_3(x_3 - x_{03}) + b_3(v_3 - v_{03})] - \frac{M_{tp}}{J_m};$$

$$M(U) = M_{const} - \xi_1(\alpha_3 - \alpha_0);$$

$$\begin{aligned} \frac{dv_3}{dt} &= \frac{k_3}{m_3} [c_3(x_3 - x_{03}) + b_3(v_3 - v_{03})] - \frac{2M_{np}}{J_m} - \\ &- [c_2(x_2 - x_1) + b_1(v_2 - v_1)] - \frac{k_1}{m_1} [c_1(x_1 - x_{01}) + b_1(v_1 - v_{01})] \\ \frac{dv_2}{dt} &= P_p - \frac{k_3}{m_3} [c_3(x_3 - x_{03}) + b_3(v_3 - v_{03})] - \frac{2M_{np}}{J_m} - \\ &- [c_2(x_2 - x_1) + b_1(v_2 - v_1)] \\ \frac{dx_1}{dt} &= v_1; \quad \frac{dx_2}{dt} = v_2; \quad \frac{dx_3}{dt} = v_3. \end{aligned}$$

Відповідні коефіцієнти пружності для ланок механізму мають визначатися так: $c_2 = \frac{3EJ}{l_2(l_2 + l_1)} + \frac{c_{np}}{2}$; $c_3 = \frac{3EJ}{l_3^3} + \frac{c_{np}}{2}$; де c_{np} – визначається умовами контакту.

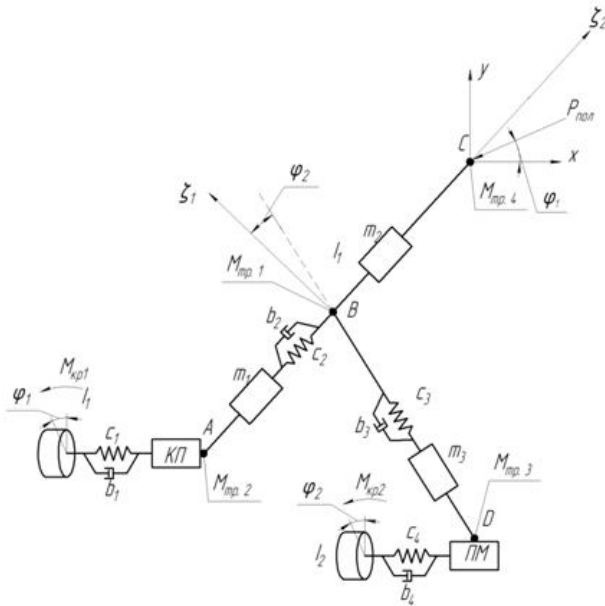


Рисунок 7 – Еквівалентна розрахункова схема механізму

Використання саме такого важливого механізму не випадкове – подібна система дозволяє моделювати переміщення як струминної головки, так і заготовки.

За розрахунковою схемою рис. 4. розроблено структурну схему формування вихідних показників якості обробки, причому динамічні процеси в окремих ланках записано у відповідних зображеннях. Це дозволило використати пакет LabView та встановити максимальні очікувані похибки форми як наслідок дії збурень у верстаті та явищ руйнування композиту.

Приймаючи, що внаслідок дії неусталеного струменя на рухому заготовку відбувається ерозія твердого тіла неоднорідної структури, і поверхні H_0V_a перетворюються на H_1, B_1 та H_2, B_2 відповідно, причому $H_1, B_1 \neq H_2, B_2$, основне рівняння для визначення δ_{max} на відповідній поверхні матиме вигляд

$$\delta_{max} = D_k + \frac{L_s}{2} + \Delta_d + \sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2}.$$

Тут прийнято D_k – розширення струменя внаслідок його витікання з калібрувальної трубки, L_s – деформація струменя при натіканні на перелону, $\sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2}$ – сумарна похибка від роботи приводів подач у двох напрямках, яка визначатиметься залежно від типу механізму. Остання складова обумовлюється також і положенням площинок руйнування на фронті гідро різання (що відповідає міркуванням [28]), і при визначенні цього параметра має бути складена інша система диференціальних рівнянь.

Дія потоку хвиль та зворотного потоку рідини на нижню крайку заготовки враховується явищами у басейні у вигляді зносу на величину δ_z . Тоді косина крайки різку α визначиться

$$\alpha = \frac{\delta_{max}}{h - \delta_z}.$$

Параметри шорсткості крайки та відхилення на торці – $Ra = \frac{1}{l_0} \int \delta_i dx$. Похибка нижньої крайки від-

повідає δ_z . Передатні функції $W(s)$ для відповідних ланок динамічної системи верстата та процесу різання представляли для контрольованих чинників, виходячи з наступних міркувань (рис. 8).

Формування повної похибки відтворення контуру є наслідком прояву вище описаних процесів, представлених ланками 1 (явища у струмені, його коливання в поперечному та поздовжньому напрямках), 2 (поведінка матеріалу), 3 та 4 (реакція матеріалу на косо кутове натікання струменя та прояв деформаційного і абразивного зношування) та 5 – дії приводів подач. Додаткове врахування хвильових явищ в басейні може бути здійснене аналогічно ланці 2, однак із введенням додаткової передавальної ланки.

Прийнято такі позначення параметрів передатних функцій: c_p – зміни статичного тиску в контурі високого тиску та у за сопловому просторі; c_m – витрати абразиву в функції розрідження у змішувальній камері; c_v – швидкості руху зерен абразиву залежно від швидкості потоку; c_g – контактного тиску на поверхні натікання; c_δ – деформації оброблюваної поверхні; c_D – швидкості двофазного потоку; c_F – швидкості стікання рідини; c_a – інтенсивності зйому матеріалу; c_{xx}, c_r – насичення струменя частинками абразиву; c_{wd}, c_{wl} – обсягу зйому матеріалу внаслідок прояву деформаційного зношування та мікрорізання; c_x, c_y – передатні відношення механізму «гвинт-гайка»; c_{xy} – результуюче переміщення; c_{va}, c'_{va} – форма виври теоретична та отримана при роботі системи.

Постійні часу $T_1 \dots T_8$ визначали за подібністю процесів, модельованих певними блоками, процесам гідро абразивного різання.

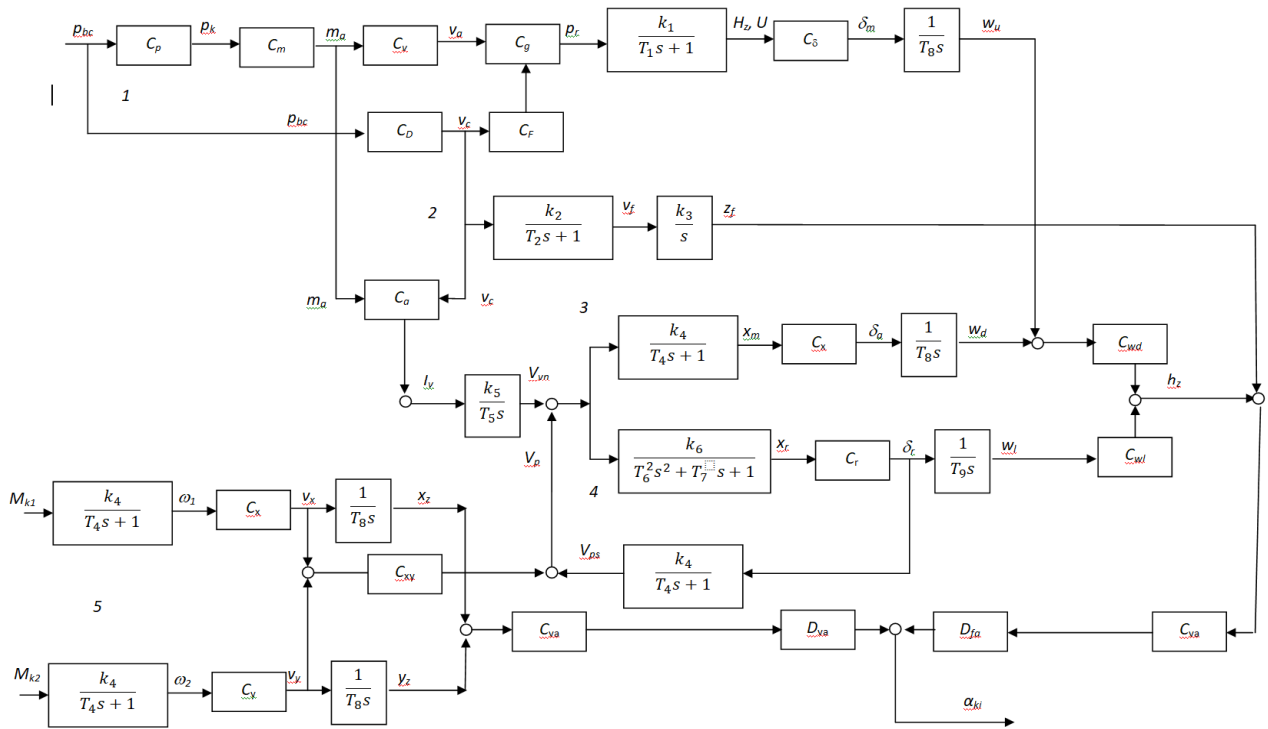


Рисунок 8 – Структурна схема для визначення похибок форми крайки різу

Результати моделювання у вигляді перехідних процесів представлено на рис. 9.

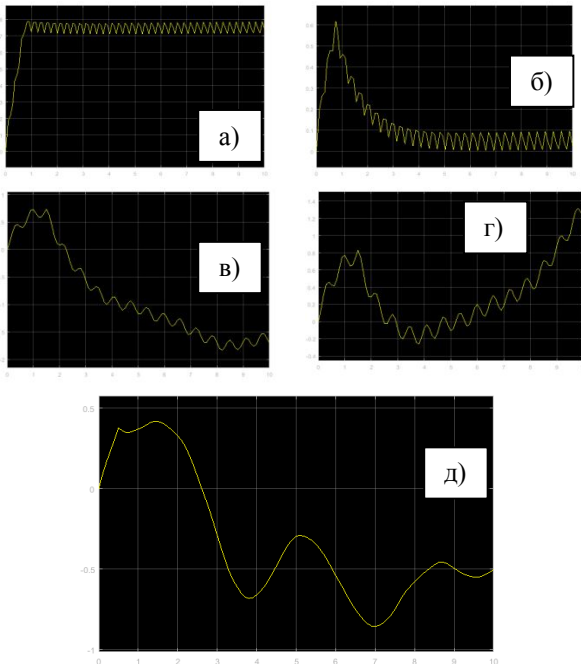


Рисунок 9 – Результати імітаційного моделювання динамічної системи гідро абразивного різання (розгортка по осі абсцис відповідає часу в 1,0 с)

Так, на рис. 9,а приведено перехідний процес формування двофазного гідроабразивного струменя при прямому ходові мультиплікатора (тобто за умови, коли реверс відсутній і скачка тиску немає); рис. 9,б відповідає умові розгону абразивних частинок у камері змішування; рис. 9,в, – навантаженню поверхні струминно-абразивним потоком, а рис. 9,г – роз-

виту вирви. Остання діаграма (рис. 9, д) відображає зміну кута нахилу крайки різу, або іншими словами – похибки відтворення контуру.

Створена модель дозволила виконати ряд модельних експериментів, результати яких представлено нижче.

Оцінено вплив умов натікання рідини на оброблювану заготовку. При цьому взято до уваги, що заготовка проявляє пружно-пластичні властивості, має певні фіксовані товщини – від 2,0 мм до 6,0 мм.

Матеріал заготовки – армований пластик, межа міцності якого становить $\sigma_s=45$ МПа. Результати моделювання подані на рис. 10.

При цьому взято до уваги, що швидкість контурної подачі наведена у відносному вигляді, як $\frac{V_i}{V_{opt}}$, де

V_{opt} – оптимальна швидкість різання заготовки.

Зміна параметра шорсткості відбувається більш динамічно, цей параметр зростає практично лінійно при збільшенні швидкості до оптимальної, що ілюструє діаграма рис. 10,а. Для більш товстих матеріалів подальше зростання швидкості веде до прогресуючого зростання шорсткості. Найбільш суттєвий вплив на вихідні параметри якості здійснює механічна система верстата (приводи подачі, ланки орієнтування струминної головки). Порівнюючи роботу важільної системи (приведеної на рис. 11) з традиційною порталною (що працює у декартовій системі координат), можна зробити висновок, що важільна система більш схильна до виникнення збурень, які негативно відбиватимуться на шорсткості поверхні та вестимуть до утворення косини крайки різу.

Однак слід зазначити, що істотного зростання косини зі збільшенням довжини важелів не спостерігається.

У той же час важільна система здійснює вплив на формування крайки з точки зору шорсткості поверхневого шару. Так, збільшення довжини важелів негативно позначається на цьому параметрі, який може сягати 120 мкм, у той час як для порталу максимальна шорсткість становить 40-60 мкм (і практично не залежить від довжини напрямних, якими елементи порталу рухаються).

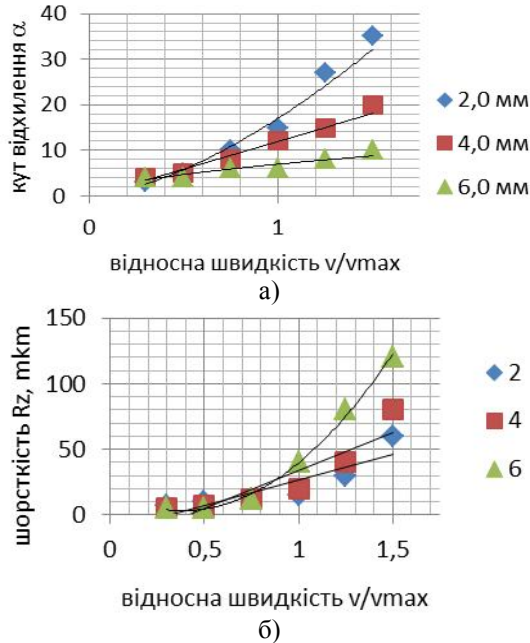


Рисунок 10 – Вплив швидкості руху заготовки відносно струминного пристрою на параметри косини різі (а) та рівень шорсткості (б)

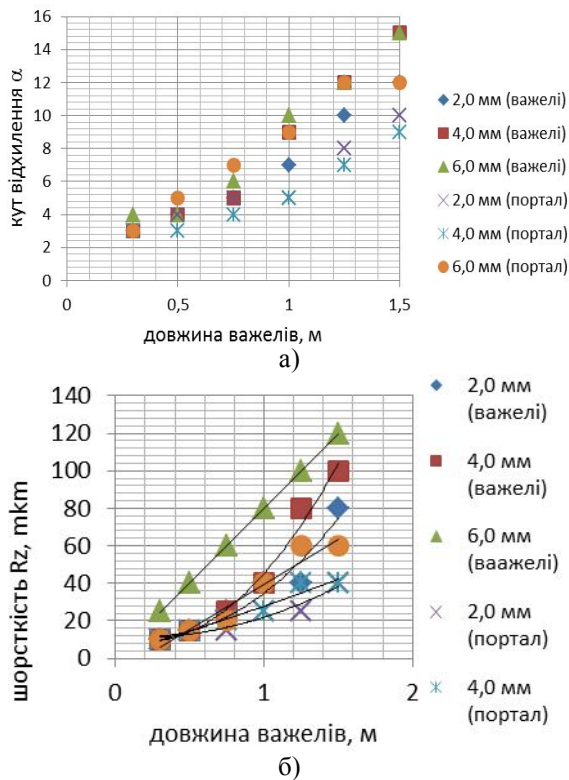


Рисунок 11 – Вплив геометричних розмірів обробної системи на параметри косини різі (а) та рівень шорсткості (б)

Таким чином, з огляду на результати досліджень стає очевидним, що використання важільної системи доцільне лише для вирізання невеликих за розмірами елементів, для яких якість крайки буде не тільки достатньо високою, а і стабільною.

При цьому зниження хвилястості та шорсткості крайки можливе за умови зменшення довжини важелів, а також надійного демпфування рухів важільної системи відповідним регулюванням шарнірів. Консоль важелів не повинна перевищувати 0,75 м, що забезпечить нормальне функціонування системи в робочому просторі 0,5x0,5 м.

ВИСНОВКИ. Запропоновано імітаційну модель функціонування верстатної гідрорізної обробної системи із приводами подач у вигляді важільного механізму із штангами змінної довжини паралелограмного типу. При цьому враховано динаміку приводу подач, хвилюві явища як у струмені, так і у басейні натікання рідини. Враховано фізико-механічні властивості оброблюваної заготовки; показано, що фізико-механічні властивості заготовки, а також її геометричні параметри безпосередньо визначають як хвилястість, так і похибки відтворення контуру.

Показано, що формування хвилястості крайки при контурному різанні відбувається у початковий момент контакту струменя із заготовкою та в моменти зміни напрямку переміщення заготовки.

Надання залежної подачі рухомому робочому органу дозволяє зменшити коливальні явища, покращити якість крайки.

З інженерної точки зору консоль важелів не повинна перевищувати 0,75 м, що забезпечить нормальне функціонування системи в робочому просторі 0,5x0,5 м.

ЛІТЕРАТУРА

1. Струтинський В. Б. Техніка та технологія гідроструминної обробки: монографія. Київ: ВІПОЛ, 1996. 282 с.
2. Кузнецов Ю. Н., Дмитриев Д. А. Концепция гибридных компоновок станков с параллельной кинематикой на модульном принципе. *Материалы Междунар. науч. конф. «Техника, технологии и системы Tekhsis 2009»*. Plovdiv: Technical University Sofia, 2009. PP. 19–36.
3. Richerzhagen G., Delactaz R.P. Salath «Complete Model to Simulate the Thermal Defocusing of a Laser Beam Focused in Water», *Optical Engineering*, vol. 35, No. 7, 1996. PP. 2058–2066.
4. Загірняк М. В. Процес і обладнання струминно-лазерного різання: монографія. Харків: Мадрид, 2013. 312 с.
5. Саленко О. Ф., Орел В. М. Розширення технологічних можливостей гідроструминного обладнання на основі нових компоновальних рішень. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Вип. 1(84). Кременчук: КрНУ, 2014. С. 160–168.
6. Кузнецов Ю. Н. Генетико-морфологический принцип создания станков нового поколения. *Вісник СевНТУ. Механіка, енергетика, екологія: збір. наук. праць* Вип. 110. Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010.

7. Andreas W. Momber Principles of Abrasive Water Jet Machining. *Springer Science & Business Media*, 2012. 394 p.
8. Фомовська О. В. Візуалізація формоутворення при гідроабразивному різанні на основі енергетичних моделей руйнування. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. 2009. Вип. 2, част. 1. С. 27–31.
9. Сазано И. И. Физические аспекты гидроабразивной обработки материалов. *Вестник МГПУ серия «Естественные науки»*. 2014. №1(13). С. 72–77.
10. Brenner V., Powell R., Louis H., Pushkarev A. Determination of the Criterion of Rock Resistance to Hydro-Mechanical and Hydro-Abrasive Cutting; *Proc. International Symp. on New Applications of Water Jet Technology*. 19-21 Oct. 1999. Ishinomaki, Japan. Ishinomaki Senshu University. P. 399–405.
11. Слободянюк В. А., Петко И. В. Формування гідроабразивного струменя для листового розкритою матеріалів легкої промисловості; *Легка промисловість*. 2007. № 2 С. 63–75.
12. Орел В. Н. Щетинин В. Т., Саленко А. Ф., Яцина Н. Н. Повышение эффективности гидроструйного использованием управляемого резания средств трещинообразования. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Прикладная механика*; Вып 1(79). Харьков, 2016. С. 81–86.
13. Седышев В. В. Физическое моделирование динамики структурированных частиц. *Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2012. № 35. – С. 73–78.
14. Effect of feed rate on surface roughness in abrasive waterjet cutting applications; A. Akkurta, M. K. Kulekcib, U. Sekerc, F. Ercand. *Journal of Materials Processing Technology*. 20 April 2004. Vol. 147, Issue 3. P. 389–396.
15. Andreas W. Momber Principles of Abrasive Water Jet Machining; *Springer Science & Business Media*, 2012. 394 p.
16. Опальницкий А. И. Перспективные физико-химические методы обработки стекла концентрированными потоками энергии. *Известия МГТУ*. 2014. № 1. С. 65–69.
17. Соколов В. А., Проволоцкий А. Е., Кузьменко О. С. Опыт внедрения гидроабразивной обработки в производство. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2009. № 5. С. 41–44.
18. Hashish M. AWJ Studies M. Hashish; 16th International Conference on WaterJetting. *BHR, Aix en Provence*, October, 16-18 2002.
19. Hydroabrasive Cutting Head, Energy Transfer Efficiency; G. Galecki, M. Mazurkiewicz; *Proc. 4th Amer. Water Jet Conf., New York*. In Hood M. Dornfeld D. editor, 1987. P. 109–111.
20. Саленко О. Ф., Фомовська О. В. Взаємодія швидкоплинного струменя малого діаметра з перпоною при торцевому натіканні. *VI Всеукраїнська науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів»*. Тези наукових доповідей. Кременчук: КДПУ, 2007. С. 82.
21. Сосновский Л. А. Механика износоусталостного повреждения. Гомель, 2007. 290 с.
22. Хохлов А. В. Кривые длительной прочности нелинейной модели вязкоупругопластичности типа Максвелла и правило суммирования поврежденности при ступенчатых нагружениях. *Вестник Самарского государственного технического университета*; vol. 20, no. 3, 2016, P. 524–543.
23. Седышев В. В. Основы гидроимпульсного струйного разрушения материала. *Сборник научных трудов по материалам международной научной конференции «Проблемы и инновации в области механизации и технологий в строительных и дорожных отраслях»*. – Иваново. 2015. №1(1). С. 49–52.
24. Hashish M. «Aspects of abrasive-Waterjet Performance Optimization», Proceeding of 8-rd International Symposium on Jet Cutting Technology, Durham, England, 09. 1998.
25. Клапцов Ю. В., Петко І. В., Панасюк І. В. К питанню про взаємодію гідроабразивного струменя з матеріалом, що розрізається. *Вісник КНУТД*. 2006. № 6. С. 51–57.
26. Using of mechanotronics devices for working movements workpieces during waterjet cutting; V. N. Orel, V. T. Shchetinin, O. V. Fomovska, A. F. Salenko; *Journal of the Technical University of Gabrovo*; Vol. 52. Gabrovo: Университетско издателство Габрово, 2015. – pp. 13–17.

REDUCTION OF WAVE AND ROUGHNESS OF THE EDGE PREPARATIONS FROM THE ACTIVITY OF THE SPEED JET IN HYDROREASIS SYSTEMS WITH MOBILE PREPARATION

S. Kovalenko

Kropivnytsky Engineering College, Central Ukrainian National Technical University
vul. Yuri Olefirinka, 6, Kropivnitsky, 25000, Ukraine

S. Melnichuk, V. Orel, A. Salenko, V. Shchetynin

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University.
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: salenko2006@ukr.net

Purpose. To determine the growth performance and to evaluate the possibility of control of the tension state of the zone water-jet cutting means pre-loading the blanks. **Methodology.** The computer simulation of the loading of the slab with the definition of areas of strain, with various influences (tensile force, torque and combined effect of force and torque) was conducted. **Results.** Hydro-cutting systems offered in the market of industrial equipment, as a rule, have a traditional layout, which provides a horizontal arrangement of the workpiece on the table, which is also a pool-trap for the flowing jet of liquid. However, when processing high-precision products that require stable quality of the ends, such systems are of little use, since periodic flow of the jet onto the table supports cause a change in the interaction conditions and lead to processing defects. It is proposed to use systems with a fixed jet head, and to make work movements

due to the motion of the workpiece. However, in this case, wave phenomena in the jet are actively manifested, so a further increase in the accuracy of the contour and the quality of the end face is seen in the establishment of rational conditions for the interaction of the jet with the workpiece at variable rates of relative motion. **Originality.** In work the conditions of occurrence of oscillations are analyzed, regularities of formation of defects of an end are established which can be leveled by maintenance of variable speed of contour submission with corresponding damping of links of system of a drive of a workpiece. It is shown that the formation of the undulation of the butt in contour cutting occurs at the initial moment of contact of the jet with the workpiece and at the moment of changing the direction of motion of the workpiece. **Practical value.** A mathematical model is proposed taking into account the dynamics of the billet under the action of the hydrodynamic shock load, the dynamics of the feed drives and the phenomenon of the high-frequency influence of the abrasive particles. It is suggested to evaluate the quality of transient processes on the basis of an imitation model of hydroabrasive cutting. References 26, figures 11.

Key words: hydroabrasive cutting; layout; flow; nonmetals; physical and technical methods of processing.

REFERENCES

1. Strutinsky, V. (1996) *Tekhnika ta tekhnolohiya hidrostrumynnoyi obrobky: monohrafiya* [Technology and technology of hydro jet processing: monograph], VIPOL, Kyiv, Ukraine.
2. Kuznetsov, Yu. N., Dmitriyev, D. A. (2009), *Kontseptsiya gibrnidnykh komponovok stankov s parallel'noy kinematikoy na modul'nom printsipe* [Concept of hybrid configurations with parallel kinematics machines on a modular principle], Tekhnika, tekhnologii i sistemy Tekhsis 2009, Int. sci. conf. proc., Technical University Sofia, Plovdiv, pp. 19–36.
3. Richerzhagen, G., Delacrtaz, R. P. Salath [Complete Model to Simulate the Thermal Defocusing of a Laser Beam Focused in Water], *Optical Engineering*, vol. 35, No.7, 1996. – PP. 2058–2066.
4. Zagirnyak, M. V. (2013), *Protses i obladnannya strumynno-lazernoho rizannya: monohrafiya* [The process and equipment of laser-jet cutting: monograph], Madrid, Kharkiv, Ukraine.
5. Salenko, O., Orel, V. (2014) *Rozshyrenny tekhnolohichnykh mozhyvostey hidrostrumynnoho obladnannya na osnovi novykh komponoval'nykh rishen'* [Enhancing technological capabilities of hydrjetting equipment based on new layout solutions] *Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, vol. 1, no. 84, pp. 160-168.
6. Kuznetsov, Yu. N. (2010), *Genetiko-morfologicheskyy printsip sozdaniya stankov novogo pokoleniya* [Genetic and morphological basis for creation of new generation machining tools], *Transactions of Sevastopol National Technical University*, vol. 110, Mekhanika, energetika, ekologiya.
7. Andreas, W. *Momber Principles of Abrasive Water Jet Machining*. – Springer Science & Business Media, 2012. – 394 p.
8. Fomovska, O. V. (2009) *Vizualizatsiya formotvorennya pry hidroabrazivnomu rizanni na osnovi enerhetychnykh modeley ruynuvannya* [Visualizing morphogenesis in abrasive waterjet cutting model based on fracture energy], *Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, vol. 2, part 1, pp. 27–31.
9. Sazanov, I. (2014) *Fizicheskiye aspekty gidroabrazivnoy obrabotki materialov* [The physical aspects of water-jet processing of materials] *Transactions of Melitopol Bogdan Khmelnytsky State Pedagogical University*, vol. 1, no. 13, pp. 72-77.
10. Brenner, V., Powell, R., Louis, H., Pushkarov, A. Determination of the Criterion of Rock Resistance to Hydro-Mechanical and Hydro-Abrasive Cutting // Proc. International Symp. on New Applications of Water Jet Technology. 19-21 Oct. 1999. Ishinomaki, Japan. Ishinomaki Senshu University. P. 399–405.
11. Slobodyanyuk, V. A., Petko, I. V. (2007), *Formu-vannyya hidroabrazivnoho strumenyt' dlya lystovoho rozkryly materialiv lehkoyi promyslovosti*, [Formation of a hydroabrasive jet for sheet metal cutting of light industry materials] *Lehka promy-slovist'*, Vol. 2, pp. 63-75.
12. Orel, V. N. Shchetinin, V. T. Salenko, A. F. Yacyna, N. N. [Improving the efficiency of hydrojet using controlled cutting tools for cracking] *Eastern European Journal of Advanced Technology. Applied mechanics*, vol. 1, no. 79, pp. 81-86.
13. Sedyshev, V. V. (2012) *Fizicheskoye modelirovaniye dinamiki strukturirovannykh chastits* [Physical simulation of the dynamics of structured particles] *Transactions of South Ural State University*, no. 35, pp. 73–78.
14. Akkurt, A., Kulekcib, M. K., Sekerc, U., Ercand, F. (2004) [Effect of feed rate on surface roughness in abrasive waterjet cutting applications] *Journal of Materials Processing Technology*. – 20 April Vol. 147, Issue 3., pp. 389–396.
15. Andreas, W. (2012) [Momber Principles of Abrasive Water Jet Machining]. – Springer Science & Business Media, – 394 p.
16. Opal'nitsky, A. I. Petrov, K. V. (2014) *Perspektivnyye fiziko-khimicheskiye metody obrabotki stekla kontsentriruyemyimi potokami energii* [Perspective physicochemical methods of glass processing by concentrated energy flows] *Transactions of Moscow State Technical University named after Bauman*, no. 1, pp. 65-69.
17. Sokolov, V. A. Provolotskiy, A. Ye. Kuz'menok, O. S. (2009) *Opyt vnedreniya gidro-abrazivnoy obrabotki v proizvodstvo* [Experience in the introduction of hydroabrasive processing in production] *Blank production in mechanical engineering*, no. 5, pp. 41–44.
18. Hashish, M. (2002) *AWJ Studies // 16th International Conference on WaterJetting*. – BHR, Aix en Provence, October, pp. 16-18.
19. Galecki, G., Mazurkiewicz, M. (1987) [Hydroabrasive Cutting Head, Energy Transfer

Efficiency] // Proc. 4th Amer. Water Jet Conf., New York. – In Hood M. Dornfeld D. editor, pp. 109–111.

20. Salenko, O. F. Fomovs'ka, O. V. (2007) Vzayemodiya shvydkoplynnoho strumenya maloho diametra z pereponoyu pry tortsevomu natikanni [Interaction of a fast-moving jet of small diameter with an obstacle at an end face] *Fizychni protsesy ta polya tekhnichnykh i biolohichnykh ob'ektiv: VI Vseukrayins'ka naukovo tekhnichna konferentsiya Tezy naukovykh dopovidey* [Physical Processes and Fields of Technical and Biological Objects: VI All-Ukrainian Scientific and Technical Conference Abstracts of scientific reports]], Kremenchuk, KrNU, p. 82.

21. Sosnovskiy, L. A. (2007), *Mekhanika iznosoustalovnoho povrezhdeniya* [Mechanics of weary damage], Gomel, Belorussia.

22. Hashish, M. (1998) [Aspects of abrasive-Waterjet Performance Optimization, Proceeding of 8-rd International Symposium on Jet Cutting Technology, Durham, England.

23. Sedyshev, V. V. (2015) *Osnovy gidroimpul'snogo struynogo razrusheniya materiala* [Fundamentals of hydroimpulsive jet destruction of the material], *Problemy i innovatsii v oblasti mekhanizatsii i tekhnologiy v stroitel'nykh i*

dorozhnykh otraslyakh Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhduna-rodnoy nauchnoy konferentsii [Problems and innovations in the field of mechanization and technology in the construction and road industries Collection of scientific papers on the materials of the international scientific conference], Ivanovo, pp. 49-52.

24. Barsukov, G. V., Mikheyev, A. V. (2008) *Opredele niye proizvoditel'nosti gidroabrazivnoy rezki s uchetom kharakteristik abrazivnogo zerna* [Determining the productivity of hydroabrasive cutting taking into account the characteristics of abrasive grain], *Directory. Engineering Journal* no. 1, pp. 9–15.

25. Klaptsov, Y. U. V., Petko, I. V., Panasyuk, I. V. (2006) *K pytannyu pro vzayemodiyu hidroabrazivnoho strumenya z materialom, shcho rozrizayet'sya* [On the question of the interaction of the hydroabrasive jet with the material being cut] *Transactions of Kyiv National University of Technologies and Design* no. 6, pp. 51-57.

26. Orel, V. N., Shchetinin, V. T., Fomovska, O. V., Salenko, A. F. (2015) [Using of mechano-tronics devices for working movements workpieces during waterjet cutting] // *Journal of the Technical University of Gabrovo*. Vol. 52. – Gabrovo, pp. 13-17.

Стаття надійшла 18.05.2018.