

УДК 621.924.093.048

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОРЕЖУЩИХ УСТРОЙСТВ
С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА****д-р техн. наук, проф. М.С. ХОРОЛЬСКАЯ; А.Ф. САЛЕНКО****(Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского, Украина);****канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН****(Полоцкий государственный университет, Беларусь);****В.Я. НИКОЛАЙЧУК****(Винницкий национальный аграрный университет, Украина);****Т.В. ВОРОНА****(Кировоградский национальный технический университет, Украина);****Е.Е. КОЖЕВНИКОВА****(Одесская национальная морская академия, Украина)**

Исследуется влияние параметров калибрующей трубки струйно-абразивных устройств на качество процесса гидроабразивной резки ответственных деталей. Приведены результаты моделирования формирования двухфазного потока и его движения в калибрующей трубке. Определено, что протекающее изнашивание проточной части трубки имеет различную интенсивность и характер. В связи с этим возникает необходимость применения функционально-ориентированного подхода к выбору средств обеспечения требуемых геометрических параметров трубки. Уменьшение интенсивности изнашивания материала в проточной части трубки и, соответственно, поддержание её геометрических параметров возможно путем использования соответствующих защитных покрытий, толщина и физико-механические характеристики которых выбираются на основе функционально-стоимостных признаков в соответствии с интенсивностью и видом абразивной нагрузки на поверхность.

Введение. Появление и широкое использование в промышленности новых конструкционных материалов, прежде всего композитов и новых высокотехнологичных изделий, предопределяет потребность в новых методах обработки. Одним из таких методов является гидроабразивное резание.

Применение гидроабразивного резания оправдывает себя особенно там, где использование традиционных методов не дает удовлетворительного качества. Исключаются дополнительные затраты на заделку или на снижение производственного темпа. Кроме того, преимуществом этого метода выступают его чистота и экологичность. Современные системы гидроабразивного резания обеспечивают непрерывную оптимизацию производственного процесса и повышения качества в обрабатывающей промышленности. Необходимость получения высокоточных результатов обработки нуждается в постоянстве и компактности струйно-абразивного потока.

Использование гидроабразивной обработки дает возможность значительно улучшить качество обрабатываемой поверхности и производительность резания, которое вызывает необходимость в разработке новых перспективных компоновок станков для обеспечения комбинированной обработки.

Среди тенденций развития гидроабразивной обработки выделяют повышение точности обработки и эффективности оборудования. Эффективность может быть повышена за счет увеличения давления жидкости (до 600 МПа) и количества одновременно работающих головок [1]. Однако повышение рабочего давления приводит к интенсификации изнашивания систем гидрорежущего оборудования, в частности калибрующих трубок (рис. 1), что в свою очередь отражается на стоимости обработки.

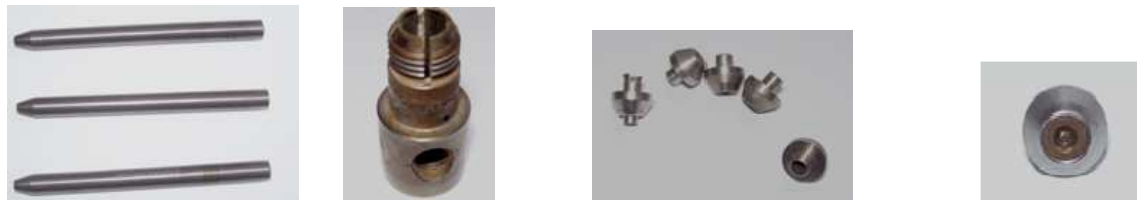


Рис. 1. Калибрующие трубки, смесительная камера и сапфировое сопло фирмы Synergicinc
(поставщик – Elfihmbh, Austria)

Постановка задач исследования. Калибрующая трубка – один из наиболее важных элементов гидрорежущей системы, который влияет на технологические и экономические характеристики резания. Производственные наблюдения доказывают, что большинство функциональных отказов при реализации

гидроабразивного резания возникает именно вследствие внезапных изменений геометрии струеформирующих элементов – сопла и калибрующей трубки. Трубка подвергается постоянному изнашиванию, вследствие чего внутренний диаметр постепенно увеличивается, что определяет износ трубки. Обычно стойкость трубки составляет 10...15 часов, а ее стоимость достигает 20...50 \$ [1].

В связи с этим актуальной становится задача повышения стойкости калибрующих трубок с применением функционально-ориентированного подхода.

Для определения особенностей изнашивания калибрующей трубки проанализируем влияние движения абразивных зерен и вид разрушения.

Известно, что при движении двухфазного потока «жидкость – твердые частицы» по калибрующей трубке происходит хаотичное действие на стенки трубки отдельных абразивных частиц под разными углами атаки и с разной силой удара [2].

Абразивное разрушение поверхности трубки зависит от характера действия абразивных зерен на её поверхность. В зависимости от направления действия абразивной струи на поверхность различают следующие схемы ее действия: разрушение ударной струей, когда угол атаки $\alpha = 90^\circ$ (рис. 2, а); разрушение скользящей струей, когда $\alpha = 0$ (рис. 2, б); разрушение косой струей, когда $0 < \alpha < 90$ (рис. 2, в) [3; 4].

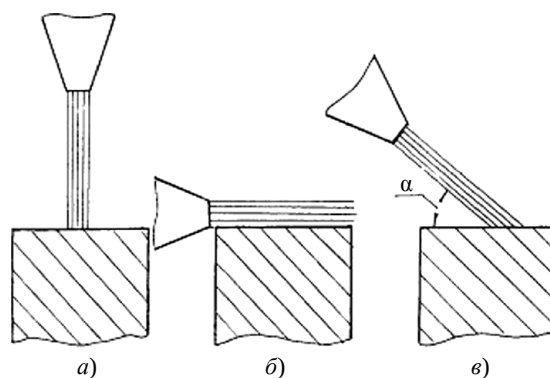


Рис. 2. Схемы действия абразивной струи на поверхность

Если на плоскую поверхность материала влияет поток твердых абразивных частиц, которые летят со скоростью v_0 под углом α к поверхности, то каждая частица, ударяясь, упруго деформирует обрабатываемую поверхность и проскальзывает по ней с трением [5].

Принято, что нормальная компонента скорости v_0 вызывает только упругую деформацию материала, а касательная v_0 , вступая в фрикционный контакт с поверхностью, частично или полностью гасится и выполняет работу резания. Таким образом, самая большая производительность обработки теоретически должны быть при угле атаки $\alpha = 45^\circ$, что подтверждается разными авторами [5–8].

Интенсивность изнашивания в абразивном потоке определяется как результат множественных ударов твердых частиц о поверхность изнашивания при разных углах атаки. Начальный период разрушения металла характеризуется внедрением абразивных частиц в поверхностный слой на некоторую глубину, второй – непрерывным перемещением частиц материала вдоль поверхностного слоя на некоторое расстояние, при котором происходит смещение микрообъемов металла в слое в направлении внедрения частиц и отрыв от массива [9].

При внедрении абразивных частиц в поверхностный слой металла в условиях свободного удара происходит деформация приконтактной зоны, вследствие чего в этом слое возникает сложное неоднородное напряженно-деформированное поле со сменной границей. Напряжение и деформации, которые возникают при внедрении абразивных частиц в металл, зависят от комплекса факторов, которые характеризуют параметры потока частиц и сопротивление металла упругопластичным деформациям.

В зоне контакта будут развиваться упругие и пластические деформации, которые будут содействовать смятию металла под частицей в радиальном направлении, с последующим тангенциальным сдвигом в направлении движения этой частицы относительно поверхности.

Глубина внедрения частицы и ее тангенциальное смещение при внедрении связаны с механическими свойствами абразива и материала изнашиваемой поверхности, размерами частиц, деформацией металла. При малых углах атаки вследствие преобладания тангенциальной компоненты скорости удара основным процессом разрушения поверхностного слоя есть тангенциальное смещение микрообъемов металла в направлении внедрения, то есть микрорезания.

При углах атаки, близких к 90° , вследствие преобладания нормальной компоненты скорости механизм разрушения поверхностного слоя металла в потоке абразивных частиц приобретает полидеформационный ударный характер.

Разрушение конструкционных материалов под действием абразивных частиц в потоке жидкости носит сложный характер, может быть вязким, хрупким, полидеформационным или приобретать усталостный характер, который осложнен явлением кавитации [9].

Таким образом, параметры внутреннего профиля трубки должны обеспечить следующие условия течения процесса [2]:

- 1) минимальную толщину пограничного слоя потока внутри трубки, турбулентного слоя исходящей свободной струи, которая уменьшается в толщине и снижает взаимодействие струи со средой;
- 2) уменьшение возможности отрыва пограничного слоя струи, содействуя уменьшению возбуждения центрального течения;
- 3) уменьшение возможности кавитации, которая обеспечивает исключение образования низких давлений внутри трубки, во избежание образования следующего объединения пузырьков и разрушения трубки.

На эффективность обработки оказывает влияние не только угол встречи частиц с поверхностью, но и физико-механические свойства материала, с которым частица сталкивается.

Приведенные в работах [5–7] теоретические зависимости позволяют оценить влияние угла атаки на интенсивность изнашивания лишь качественно. Поэтому для анализа явлений, которые происходят в калибрующей трубке во время формирования жидкостно-абразивного потока, использовали программный комплекс FlowVision.

При моделировании ставилась задача выявления обусловленности эпюр нагрузки на поперечном срезе калибрующей трубки микрогеометрическими параметрами струйной эрозии, установить роль и активность волновых процессов, которые возникают в струе и совершают действие на внутренний диаметр калибрующей трубки.

Ядром пакета является блок численного решения уравнения движения жидкости в ортогональной системе координат (уравнение Навье – Стокса (1)), которое для определенных начальных и предельных условий, заданных пользователем, позволяет получить эпюры распределения скоростей и динамического давления в точке контакта струи с той или другой поверхностью:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\phi^2}{r} = f_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} - \frac{v_r}{r^2} \right); \\ \frac{\partial v_\phi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + v_z \frac{\partial v_\phi}{\partial z} - \frac{v_r v_\phi}{r} = f_\phi - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\phi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 v_\phi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} - \frac{v_\phi}{r^2} \right); \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \phi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right). \end{cases} \quad (1)$$

где f_r, f_ϕ, f_z – напряжения массовых сил вдоль соответствующих осей: r, ϕ, z ; ν – кинематическая вязкость; $\frac{\partial v_r}{\partial r}, \frac{\partial v_r}{\partial \phi}, \frac{\partial v_r}{\partial z}, \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi}, \frac{\partial v_\phi}{\partial z}, \frac{\partial v_z}{\partial \phi}, \frac{\partial v_z}{\partial z}$ – компоненты скоростей деформирования элементарного объема жидкости (одноименные производные описывают скорость деформации сжатия или растягивания линейных элементов выделенного объема, а разноименные – скорость изменения углов между ними); ρ – массовая плотность жидкости; v_r, v_ϕ, v_z – скорости движения элементарного объема относительно соответствующих координат.

Отысканные значения напряжений массовых сил вдоль соответствующих осей при условии неразрывности $\frac{\partial(v_r r)}{\partial r} + \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + r \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$ позволяют определить массовую силу, которая действует на объем жидкости и рассматривается как

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

где W – элементарный объем.

Начальные условия определяются геометрическим профилем соплового насадка, давлением жидкости и её свойствами.

Предельные условия обуславливают натекание струи на поверхность, которая представляет внутреннюю цилиндрическую поверхность калибрующей трубки.

Массоперенос определяли по (2) исходя из уравнения Стокса, которое определяет силу сопротивления частицы в потоке:

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

где μ – коэффициент затраты жидкости через сопло; d_s – диаметр трубки.

Для определения параметров системы была создана трехмерная модель области свободной струи и с помощью программного пакета FlowVision определено давление и скорость в струе.

Для модельных исследований была рассмотрена задача натекания струи жидкости, истекающей из отверстия диаметром 1 мм. С целью определения давления и скорости жидкости в струе была создана и решена задача со свободной поверхностью.

Были заданы следующие физические параметры:

- начальные параметры;
- опорные величины – температура 273 К, давление 101000 Па;
- параметры модели – плотность жидкости 1000 кг/м³;
- жидкость – чистая вода;
- адаптация – сетки максимум до 2 уровня.

Заданы предельные условия для элементов: стенок, входа, выхода, а также задана степень адаптации для каждого из них. Скорость струи на входе 300 м/с.

Задана начальная сетка из 25652 ячеек, из них 21168 расчетных сгущали сетку в зоне выхода из сопла и возле поверхности натекания.

Заданы общие параметры модели и время протекания расчетов в пределах от 0 до $5 \cdot 10^{-5}$ с, расчеты стандартные. Результаты расчетов представлены в виде эпюр (рис. 3, а, б): заливка – давление в диапазоне от 0 Па до 250 МПа; скорость – изолинии, от 0 до 300 м/с [11].

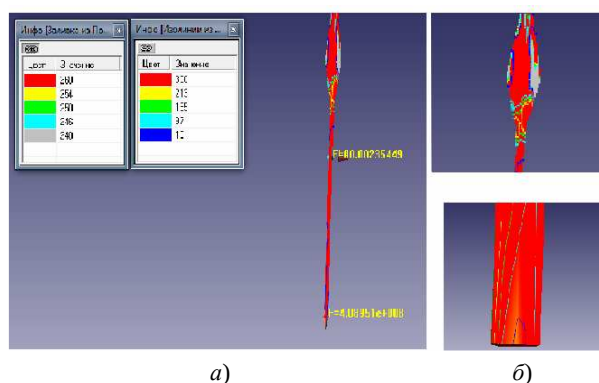


Рис. 3. Результаты моделирования взаимодействия жидкостно-абразивной смеси со стенками калибрующей трубки

Исследования показали, что наиболее нагруженными с точки зрения абразивного изнашивания являются места входа жидкостно-абразивной смеси и выхода из трубки (см. рис. 3). В этих зонах поперечное давление, вызванное волновыми процессами, максимально влияет на подвижные частицы абразива.

Представленный микроснимок кромки сопла (рис. 4) доказывает, что разрушение происходило именно на той части, которая воспринимала максимальную гидродинамическую нагрузку, вызванную обратной волной в момент натекания струи на преграду – обрабатываемую поверхность.

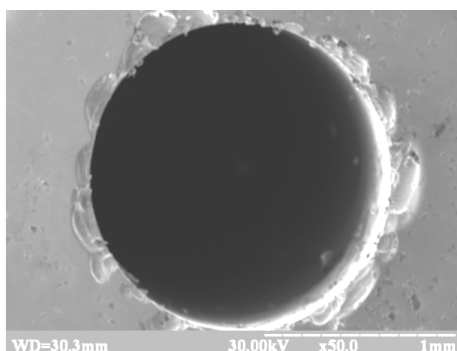


Рис. 4. Микроснимок изношенной кромки трубки

Итак, картина повреждения трубки отвечает смоделированным параметрам эпюры давления как в продольном, так и поперечном сечении соплового канала. Полученная на рисунке 5 осциллограмма свидетельствует о периодическом росте давления на кромке сопла с амплитудой от 0 Па до 250 МПа и частотой $2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, которая свидетельствует о наличии волновых процессов в самом теле струи.

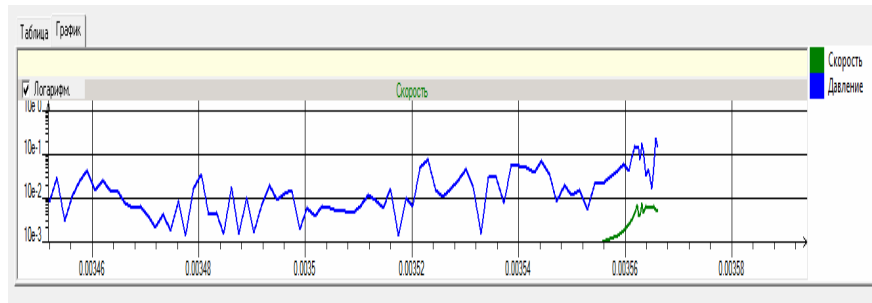


Рис. 5. Изменения скорости и давления при натекании струи на стенки калибрующей трубки

Износоустойчивость σ_w материалов калибрующих трубок при гидроабразивном изнашивании – сложная и неоднозначная функция условий взаимодействия материала с абразивными частицами и средой [3]:

$$\sigma \downarrow w = \sigma T \Pi; d K_m T; K'_\phi; v; \alpha; \chi,$$

где T – продолжительность изнашивания; Π – концентрация абразивных частиц в жидкости; d – размер частиц; K_m – коэффициент твердости, равный отношению твердости материала к твердости абразивных частиц; K'_ϕ – коэффициент, который характеризует форму частиц; v – скорость абразивных частиц в момент удара о поверхность детали; α – угол наклона вектора скорости частицы к изнашиваемой поверхности (угол атаки); χ – коэффициент, который характеризует снижение механических свойств материала в результате разупрочняющего физико-химического действия среды.

Общий объем изъятых материалов при взаимодействии гидроабразивной струи со стенками калибрующей трубки можно представить как

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

Глубина лунки δ_n и ее длина δ_a в функции параметров процесса выражаются формулами:

$$\delta_n = \frac{m v_n^2}{2} \frac{R_a}{k_n z_n H B}; \quad (4)$$

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

где m – масса абразивных частиц; v_n, v_a – нормальная и тангенциальная составляющая скорости удара частицы с обрабатываемой поверхностью; R_a, HB, σ_b – параметры шероховатости, твердости и прочности поверхности; z_n – зернистость абразивных частиц; T_p – постоянная, которая учитывает инерционность процесса микрорезания; k_n, k_a – постоянные коэффициенты.

Поскольку калибрующая трубка воспринимает гидродинамические и механические нагрузки от действия быстро движущихся частиц абразива, которые вводятся в поток жидкости по срезу сопла, поэтому изнашивание проявляется в увеличении калибрующего отверстия D_k свыше установленного предельного размера и скалываний отдельных элементов, вследствие чего меняется геометрия сформированной канавки реза (рис. 6). Это повреждение обусловлено явлениями износа. Логически возникает задача повышения стойкости калибрующих трубок путем нанесения защитных покрытий.

Использование специальных износостойких покрытий позволяет значительно повысить срок стойкости материалов в агрессивных средах, улучшить стабильность процесса за счет менее интенсивной динамики изменения начальных геометрических параметров канала [11]. Однако ныне не существует четких рекомендаций относительно типа покрытий, которые могут быть использованы в данной практике, а также рациональных технологий нанесения таких покрытий на внутреннюю поверхность канала.

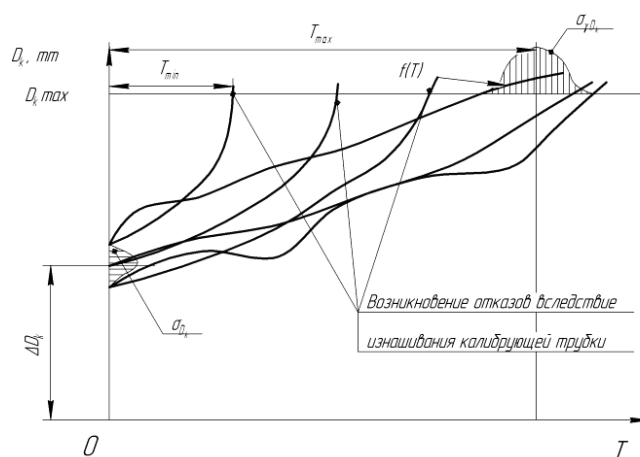
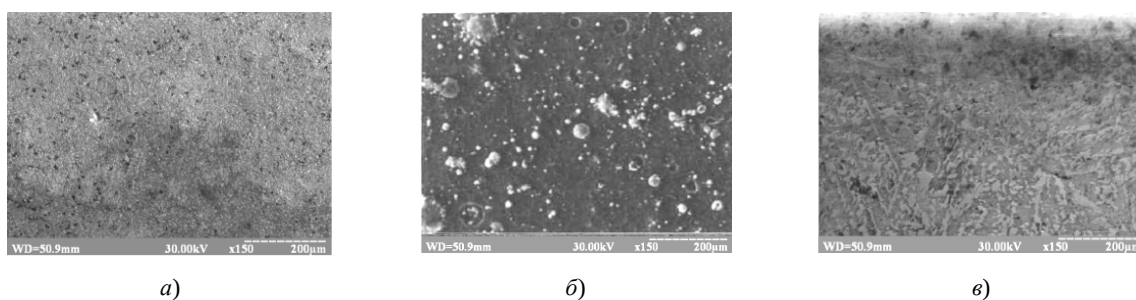


Рис. 6. Зависимость изменения калибрующего отверстия от времени срабатывания

При решении вопроса относительно целесообразности использования определенных поверхностных покрытий испытывали образцы на гидроабразивную стойкость размером $40 \times 10 \times 5$ мм из твердого сплава ВК 8, который является инструментальным материалом элементов систем гидроабразивной обработки, как без покрытия, так с вакуум-плазменным покрытием TiN, с азотированным слоем и комбинированным покрытием из азотированного слоя и TiN (рис. 7). Режимы нанесения покрытий приведены в таблице.

Рис. 7. Микроэлектронные исследования сплава ВК 8:
а – без покрытия; б – с покрытием TiN; в – с азотированным поверхностным слоем

Режимы нанесения покрытий

Параметры	Вакуум-плазменное напыление TiN	Ионно-плазменное термоциклическое азотирование
Давление рабочее P	$2,2 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.	100 Па
Сила тока дуги I_0 , А	100	10
Температура T , °C	520	550
Напряжение U , В	500	600
Время, мин	40	360

Для микроэлектронных исследований, с учетом функционально-ориентированного подхода, на плоские пластинки наносились покрытия, которые устанавливались для исследований под определенными углами к натекающей струе (см. рис. 7).

Функционально-ориентированный подход предполагает изготовление калибрующей трубки по специальной технологии, которая основана на точной топологично ориентированной реализации потребного множества алгоритмов технологического воздействия средств обработки на необходимых микро-, макрозонах и участках изделия, которые функционально отвечают условиям их эксплуатации в каждой отдельной его зоне.

Для проведения сравнительного анализа все экспериментальные исследования производились при одних и тех же параметрах обработки, которые были приняты следующими: давление натекания – 280 МПа; объемная концентрация абразива в суспензии – 0,6 кг/мин; время обработки – 10,5 минут.



Рис. 8. Установка исследуемого образца.
Рабочий стол гидрорежущей машины ЛСК-400-5

Исследование влияния угла атаки на износостойкость образцов проводились с использованием абразива в суспензии гранатового песка с зернистостью 30 меш. Расстояние между исходным сечением эжекционной насадки струйного аппарата и образцом принималось равным 80 мм.

На рисунке 9 представлены сравнительные диаграммы изнашивания покрытий TiN и комбинированного покрытия азотированный слой + TiN, представленные в виде глубины повреждения слоя, измеренного относительно плоскости обрабатываемой поверхности. Угол натекания на образцы – 15° ($\pi/12$).

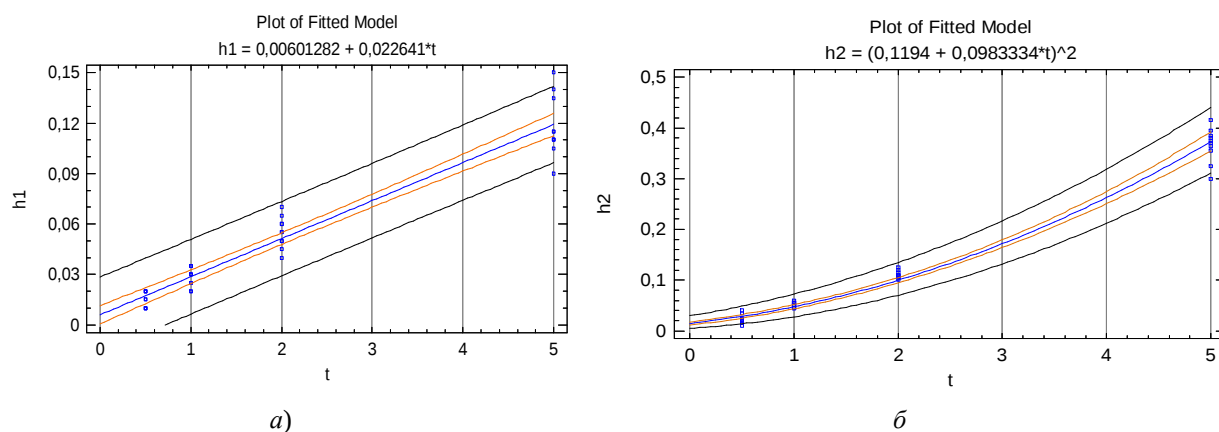


Рис. 9. Сравнительные диаграммы изнашивания покрытия TiN (а) и комбинированного покрытия азотированный слой + TiN (б)

Установлено, что динамика повреждения защитных покрытий принципиально отличается: покрытие TiN изнашивалось более динамично и через 3 мин повреждение достигло максимума. После этого скорость повреждения замедлилась, и на образцах начала наблюдаться зоны почти полного его изъятия. В дальнейшем началось активное разрушение материала основы (рис. 10).



Рис. 10. Исследуемые образцы после испытаний

Образцы с комбинированным покрытием были более стойкими к жидкостно-абразивному и кавитационному изнашиванию (почти в 3 раза). Изнашивание происходило равномерно, без образования областей отслоения.

На приведенных диаграммах представлена зависимость степени повреждения в виде глубины лунки, которая образовывалась на поверхности (h) в течение установленного времени. Построена зависимость изменения глубины сформированной лунки в функции угла натекания струи α .

Влияние угла натекания струи на скорость снятия покрытия определяли путем измерения проникновения струи в исследуемый образец за время, равное 1 мин (рис. 11). Измерения осуществляли в диапазоне углов от 3° ($\pi/60$) до 30° (дальнейшее увеличение углов приводит к полному разрушению покрытия и основы и получению паза 3...4 мм). Адекватность полученных моделей – 95 %.

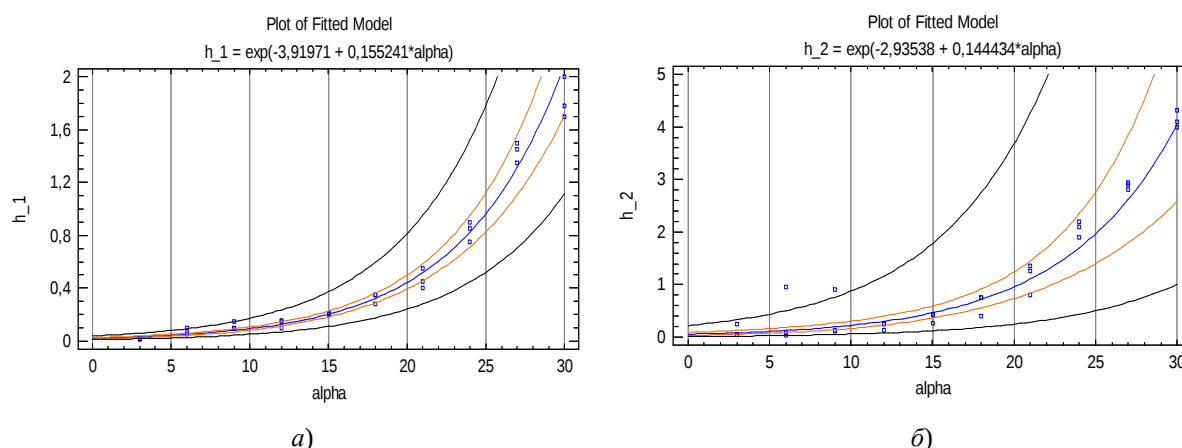


Рис. 11. Зависимость изнашивания покрытия TiN (a) и комбинированного покрытия азотированный слой + TiN от угла натекания струи (b)

По полученным данным несложно сделать вывод, что наиболее эффективно работает покрытие при касательном натекании струи. Принятое время срабатывания – 1 мин не является показательным, поскольку такую продолжительность необходимо было установить для обеспечения сравнения измерений динамики изнашивания при больших углах натекания.

Сравнение стойкости образцов с покрытиями и без покрытия доказывает, что покрытие позволяет получить двузонную динамику роста исходного отверстия калибрующей трубки: до времени срабатывания покрытия и при работе трубки с уже изношенным покрытием.

Итак, сравнительные экспериментальные испытания показали, что в зависимости от режимов обработки, образцы с комбинированным покрытием из азотированного слоя и TiN изнашиваются менее интенсивно, чем образцы без покрытия при влиянии гидроабразивного потока.

Отличие механизмов взаимодействия абразивных частиц с поверхностью вдоль канала трубки и стремление обеспечить приблизительно одинаковую низкую скорость эрозии, учитывая современное развитие функционального подхода, рассмотрено в работах О. Михайлова [12–13] и других авторов. Это позволяет сделать вывод о наличии на поверхности четко детерминированных функциональных макрозон, отличительные свойства которых требуют и различных средств их обеспечения.

Таковыми средствами могут стать соответствующие покрытия, которые удовлетворительно будут воспринимать тот или другой вид абразивной нагрузки. Однако сложность состояла как раз в том, что диаметр отверстия трубки неодинаковый и достаточно малый – от 4,2 мм на входе трубки и до 0,95...1,20 мм на ее срезе.

Однако использование покрытий предусматривает как изменение конструкции самой трубки, так и изменение материала, из которого она изготовлена.

Нами предложено использовать калибрующие трубки принципиально новой конструкции. Износостойкая калибрующая трубка для формирования жидкостно-абразивной режущей струи была изготовлена из двух симметричных частей. Части трубки объединены между собой механическим путем, в частности, эти обе части трубки охвачены обоймой, посаженной с натягом, с образованием продольного осевого канала для прохождения рабочей жидкости с абразивом. На поверхности продольного осевого канала для предупреждения развития повреждений от гидроабразивного влияния потока нанесен износостойкий фрагментарный слой. Износостойкий фрагментарный слой согласно функционально-ориентированному подходу представляет собой адгезионную пленку из материалов, интенсивность изнашивания которых для разных условий воздействия гидроабразивного потока одинакова. Длина износостойкого слоя (его фрагмента) соответствует длине участка, где действие абразивных частиц отличается большей интенсивностью. Согласно функционально-ориентированному подходу такое изделие может реализовывать ряд функций. По нашему мнению, изготовление трубки с износостойким фрагментарным слоем является

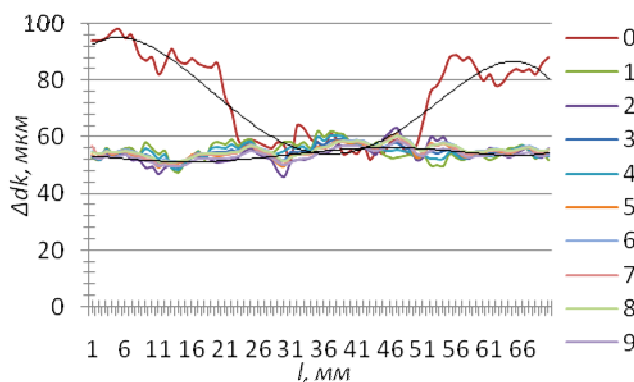
более рациональным, чем изготовление всей трубки не только из более износостойкого, но и из более дорогостоящего материала.

Для проверки изложенных соображений и получения реальных профилей изнашивания было изготовлено 10 калибрующих трубок с нанесенными фрагментарными слоями (рис. 12) и проверено после установленного срока эксплуатации ($T = 10,0$ ч). Материал трубки – регенерированный твердый сплав группы ВК с покрытием из нитрида титана TiN толщиной 1,5 мм (фракционность 30/50 мкм).

Покрытие в зоне 1, где движение абразивных зерен менее упорядочено, наносили методом электроконтактного припекания. В зоне 2, где канал воспринимает в основном скользящее влияние от частиц движущегося абразива, наносили PVD-покрытие на торце трубки, где имеет место влияние унесенных с поверхности обработки частиц, наносили PVD-покрытие с азотированием (N+TiN). Толщина азотированного слоя – 200 мкм, покрытие TiN – 10 мкм.



а)



б)

Рис. 12. Трубки с нанесенным покрытием (а) и профиль изнашивания канала после 10 часов работы (б):

0 – профиль изношенного канала трубки без покрытия;

1–9 – профили изношенных каналов с фрагментарным покрытием

Результаты, полученные в ходе эксперимента, показали:

- нанесенные покрытия надежно защищают канал трубки;
- удалось избежать возникновения зародышей интенсивного разрушения на поверхности канала;
- проявились места стыковки различных слоев по длине канала;
- слой PVD-покрытия с азотированием (N+TiN) в 200 мкм оказался практически удаленным;
- развитие повреждения канала происходило равномерно, практически без нарушения исходной диаметральной части.

Исследования выполняли с использованием лазерно-струйного комплекса ЛСК-400-5.

Таким образом, можно констатировать, что предложенный нами функциональный подход является более эффективным в сравнении с другими средствами снижения интенсивности изнашивания и повышения стабильности геометрических параметров канала трубки, представленными в работах [14–15]. В то же время нуждаются в дальнейшем исследовании варианты нанесения износостойких слоев, а в перспективе – попытки инверсного создания калибрующей трубки, т.е. наращивание пластов от канала (выполненного из материала, который затем может быть легко удален) к внешней поверхности. В таком случае очевидно преимущество формирования такого поверхностного слоя канала, при котором нитридные или карбидные соединения могут быть сориентированы так, чтобы образованная поверхность имела низкое гидравлическое сопротивление. Для этих исследований целесообразно привлечение средств Rapid Prototyping. Сейчас ведутся работы с заменой регенерированного твердого сплава более дешевым материалом, например легированной сталью. При этом выявленные закономерности и подходы, по нашему мнению, могут быть использованы в любых ответственных струйных устройствах.

Выводы. Построенная модель течения двухфазной высокоскоростной гидроабразивной режущей струи в проточной части калибрующей трубки позволила доказать существование определенных зон, в которых отлительно проявляются процессы повреждения канала, на основе чего предложено использовать функциональный подход и создана новая конструкция трубки, которая предусматривает наличие фрагментарных функциональных слоев на поверхности канала. Выполненные экспериментальные испытания предлагаемых типов калибрующих трубок доказали приведенные соображения.

Гарантированная стойкость калибрующих трубок предлагаемого типа превышает стойкость обычных трубок в среднем в 1,5...1,8 раза и составляет около 17,5 часов, при этом рассеивание составляет 10...12 %.

Полученные функциональные зависимости изнашивания калибрующей трубки с покрытиями по критериям гидроабразивной стойкости дополняют общую методологическую информационную базу и, безусловно, содействуют разработке принципа управления свойствами поверхностного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саленко, О.Ф. Перспективи ринку обладнання для листової обробки / О.Ф. Саленко, О.В. Фомовська // Вісник КДПУ. – 2008. – № 6(48). – С. 45–50.
2. Степанов, В.С. Современные технологические процессы механического и гидроструйного раскроя технических тканей. Библиотека технолога / В.С. Степанов, Г.В. Барсуков. – М.: Машиностроение, 2004. – 240 с.
3. Цыгановский, А.Б. Определение степени влияния угла атаки струи на производительность и качество гидроабразивной обработки затопленными струями / А.Б. Цыгановский // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2009. – № 6. – С. 220–228.
4. Проволоцкий, А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей / А.Е. Проволоцкий. – К.: Техника, 1989. – 177 с.
5. Непомнящий, Е.Ф. Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа / Е.Ф. Непомнящий // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа / Е.Ф. Непомнящий. – М.: Наука, 1971. – С. 190–200.
6. Клейс, И.Р. Основы выбора материалов для работы в условиях газобразивного изнашивания / И.Р. Клейс // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, № 2. – С. 263–271.
7. Билик, Ш.М. Абразивно-жидкостная обработка металлов / Ш.М. Билик. – М.: Машиностроение, 1960. – 198 с.
8. Подураев, В.Н. Физико-химические методы обработки / В.Н. Подураев, В.С. Камалов – М.: Машиностроение, 1973. – 346 с.
9. Виноградов, В.Н. Абразивное изнашивание / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, М.Г. Колокольников. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
10. Дудюк, В.О. Аналіз динамічного навантаження елементів зони гідро різання із використанням прикладного пакету FlowVision / В.О. Дудюк // Вісник КНУ імені Михайла Остроградського. – 2010. – № 6(65). – С. 59–62.
11. Лопата, Л.А. Адгезионная прочность и остаточные напряжения при электроконтактном припекании порошковых покрытий / Л.А. Лопата // Проблемы прочности. – 2010. – № 4. – С. 71–76.
12. Михайлов, А.Н. Разработка технологий на основе функционально-ориентированного подхода / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 450 с.
13. Михайлов, А.Н. Упрочняющие технологии и покрытия / А.Н. Михайлов, В.А. Михайлов, Е.А. Михайлова // Машиностроение. – 2005. – № 7. – С. 3–9.
14. Сичук, В.А. Нові принципи конструювання і виготовлення сопел для абразиво-струменевих машин / В.А. Сичук, О.В. Заболотний // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2012. – № 1(6). – С. 317–321.
15. Anand Umang. Prevention of nozzle wear in abrasive water suspension jets (AWSJ) using porous lubricated nozzles. / Anand Umang, Katz Joseph // Baltimore, MD 21218. Trans. ASME: J. Tribol. – 2003. – P. 168–180.

Поступила 11.02.2014

USING A FUNCTIONAL APPROACH IN SOLVING PROBLEMS IMPROVE PERFORMANCE WATERJET EQUIPMENT

**M. KHOROLSKAJA, A. SALENKO, A. DUDAN,
V. NIKOLAJCHUK, T. VORONA, E. KOZHEVNIKOVA**

The paper shows the influence of parameters of the calibration tube jet-abrasive devices on the quality of the process of waterjet cutting critical parts. The results of modeling the formation of two-phase flow and its movement in the calibration tube. Determined that the effects wear ductal fluid of the tube varying intensity and character. In this regard there is the need for functional-oriented approach to the choice of means to ensure the desired geometric parameters of the tube. It is concluded that the decrease in the intensity of ductal Shot material of the tube and thus maintain its geometric parameters is possible by the use of suitable protective coatings, thickness and physical and mechanical characteristics are selected on the basis of Value attributes according to the intensity and type of abrasive loading surface.