



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

УДК 621.924.093.048

А.Ф. САЛЕНКО, д-р техн. наук, профессор

заведующий кафедрой процессов и оборудования механической и физико-технической обработки¹

E-mail: Salenko2006@ukr.net

М.С. ХОРОЛЬСКАЯ

ассистент кафедры процессов и оборудования механической и физико-технической обработки¹

E-mail: mariannamax@yandex.ru

Б.А. ЛЯШЕНКО, д-р техн. наук, профессор

заведующий лабораторией упрочнения поверхности элементов конструкций²

E-mail: coating@ipp.kiev.ua

Л.А. ЛОПАТА, канд. техн. наук

старший научный сотрудник²

E-mail: beryuza@ukr.net

¹Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского, г. Кременчуг, Украина

²Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, г. Киев, Украина

Поступила в редакцию 24.11.2015.

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУИ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО- ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

В работе приведены результаты исследований по повышению стойкости струеформирующих элементов гидроабразивных систем путем использования ряда специальных покрытий, форма, вид и место нанесения которых установлены на основе функционально-ориентированного подхода. Показано влияние параметров повреждения калибрующей трубки — струеформирующего элемента — на качество процесса гидроабразивной резки ответственных деталей. Приведены результаты моделирования формирования двухфазного потока и его движения в калибрующей трубке. Установлено, что явления износа проточной части трубки имеют различную интенсивность и характер. Это и обуславливает целесообразность применения функционально-ориентированного подхода к выбору средств обеспечения требуемых параметров элемента. Сделан вывод, что уменьшение интенсивности съема материала с проточной части трубки и, соответственно, поддержания ее 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 абразивного изнашивания.

Ключевые слова: гидроабразивное резание, калибрующая трубка, износ, защитные слои, функционально-ориентированный подход

Введение. В настоящее время гидроабразивная резка листовых заготовок из различных материалов активно и широко внедряется в производственные процессы современного машиностроения. Перспективность этого метода не вызывает сомнений и определяет значительное количество исследований, направленных на изучение, усовершен-

ствование и развитие данного вида обработки. Основными тенденциями развития гидроабразивного резания остаются повышение точности обработки, улучшение качества реза, снижение негативного влияния на окружающую среду, повышение эффективности оборудования за счет новых технических решений и комплексной автоматизации процесса.

Эффективность и производительность процесса может быть повышена в первую очередь за счет повышения давления жидкости (до 600 МПа), а также применения нескольких одновременно работающих головок [1, 2]. Однако повышение рабочего давления приводит к более интенсивному изнашиванию систем оборудования, в частности, калибрующих трубок (рисунок 1), что негативно отражается на стоимости обработки.

Другие исследования показывают [3], что отсутствие систематизированных сведений о природе, сроках и моделях наступления отказов и повреждений систем оборудования, в первую очередь, струеформирующих (водяного сопла и калибрующей трубки как формирующего элемента режущей струи), ведет к значительным потерям, связанным с появлением устранимого и неустраняемого брака. Особенно остро стоит вопрос при раскрое высокоточных дорогостоящих заготовок из композиционных материалов повышенной прочности, при просекании отверстий. Так, выход параметров получаемых отверстий за установленные допуски при перфорировании заготовок обшивки мотогондол самолета выведет к необратимому повреждению изделия в целом. Именно поэтому вопросы повышения работоспособности элементов гидрорежущих устройств, а также их стойкости остаются актуальными.

Постановка задач исследования. Калибрующая трубка — один из наиболее важных элементов гидрорежущей системы, который непосредственно определяет режущие свойства струи и влияет на технологические и экономические характеристики резания процесса в целом. Производственные наблюдения доказывают, что большинство функциональных отказов при гидроабразивном резании возникает именно вследствие внезапных изменений геометрии струеформирующих элементов — сопла или калибрующей трубки. Канал трубки подвергается постоянному действию частиц абразива,

вызывающих изнашивание, вследствие чего его диаметр постепенно увеличивается, а энергоэффективность струи снижается. Обычно стойкость трубки составляет 10–15 ч, реже — до 20 ч, а ее стоимость достигает 50–100 долл. США [2].

Рассматривая условия воздействия на канал трубки абразивных зерен от момента попадания в трубку до момента выхода за ее срез, можно выделить отдельные участки, в которых механизмы повреждения и их интенсивность будут отличаться. Тогда, учитывая, что стоимость трубки должна быть как можно меньшей, а стойкость как можно большей и одинаковой для всех участков канала, целесообразен переход от цельного высокоточного изделия к составному, материальные носители которого будут в наиболее полной мере отвечать требованиям стойкости канала. Использование функционально-ориентированного подхода в этом случае представляется наиболее целесообразным.

Целью данной работы является повышение работоспособности формирующего элемента режущей гидроабразивной струи — калибрующей трубки — на основе стабилизации и снижения интенсивности развития повреждений с использованием функционально-ориентированного подхода.

Материал исследований. Для определения особенностей изнашивания калибрующей трубки в работах [4–6] проанализировано движение абразивных зерен в потоке и вид вызываемого повреждения поверхности. При движении двухфазного потока «жидкость — твердые частицы» по калибрующей трубке происходит хаотическое действие на стенки трубки отдельных абразивных частиц под разными углами атаки и с разной силой удара.

Устремляясь к поверхности, частицы контактируют с ней, осуществляя упруго-пластическое вдавливание при углах, близких к нормальным, деформационно-контактное повреждение при острых углах и микрорежущее повреждение при малых углах. При этом разрушение материала под действием абразивных частиц может приобретать усталостный характер и осложняться явлениями кавитации.

Традиционно считается [7], что нормальная компонента скорости v_n вызывает только упругую деформацию материала, а касательная v_a , вступая во фрикционный контакт с поверхностью, частично или полностью гасится и выполняет работу микро-резания (рисунок 2). 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 происходят смещения микрообъемов металла в слое в направлении внедрения частицы и отрыв их от массива [7].

При внедрении абразивной частицы в поверхностный слой металла под острыми углами в условиях свободного удара происходит деформация при-контактной зоны, вследствие чего в этом слое



Рисунок 1 — Калибрующие трубки, смесительная камера и сапфировое сопло фирмы Elfish Mbh. Austria (поставщик — Synergic Inc. Ltd.)

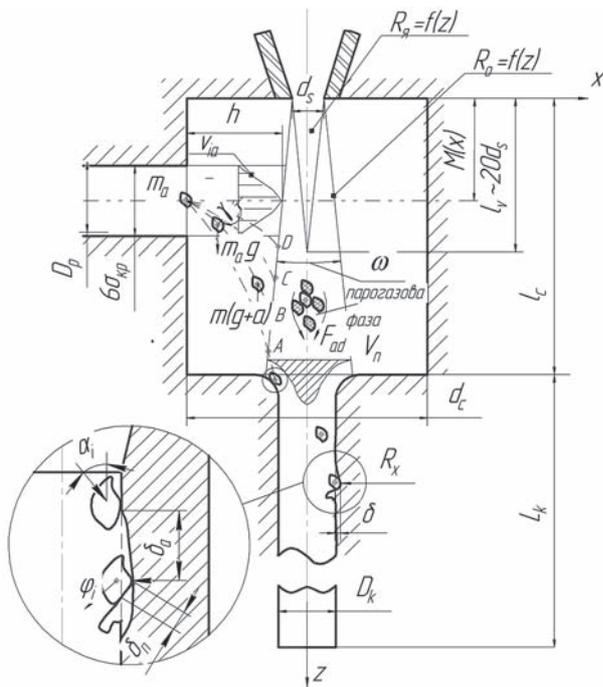


Рисунок 2 — Схемы действия абразивных частиц на поверхность канала калибрующей трубки под углами, близкими к нормальным, и при движении по касательным траекториям

возникает сложное неоднородное напряженно-деформированное поле со сменной границей. Напряжение и деформации, которые возникают в месте воздействия, зависят от комплекса факторов, характеризующих параметры потока частиц и сопротивление металла деформациям упругопластичности.

При малых углах атаки, вследствие преобладания тангенциальной компоненты скорости удара, основным процессом разрушения поверхностного слоя является 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.

Общий объем удаленного материала при воздействии гидроабразивной струи на стенки канала калибрующей трубки будет составлять:

$$W_z = \left(\frac{\pi \delta_n^2 (3r - \delta_n)}{3} + \sqrt{r^2 - (r - \delta_n)^2} \delta_n \right) \frac{M_a}{m} \tau, \quad (1)$$

где M_a — массовый расход абразива; δ_n — вжатие частицы в поверхность; δ_a — длина зоны контакта:

$$\delta_n = \frac{R_a m_a \sin \epsilon_i}{2k_n z_n H_V} \left(K \left(\frac{L}{Z_c} \right)^{\frac{4}{3}} \frac{2\mu p_b}{\sqrt{2p_b \rho + \frac{M_a}{f_k}}} \right)^2; \quad (2)$$

$$\delta_a = \frac{m_a z_n \cos \epsilon_i}{2k_a \sigma_b} \left(K \left(\frac{L}{Z_c} \right)^{\frac{4}{3}} \frac{2\mu p_b}{\sqrt{2p_b \rho + \frac{M_a}{f_k}}} \right)^2 - \frac{k_a T_p^2 \sigma_b R_a}{2m z_n},$$

где m_a — масса абразивных частиц; R_a, H_V, σ_b — параметры шероховатости, твердости и прочности поверхности; z_n — зернистость абразивных частиц; r — радиус частицы; L — длина; Z_c — расстояние от среза сопла до поверхности попадания частицы; K — коэффициент пропорциональности, учитывающий соотношение диаметров сопла и калибрующей трубки, а также расход и дисперсность абразива; p_b — давление в точке соударения частицы с поверхностью канала; ρ — плотность жидкости; μ — коэффициент расхода сопла; M_a — массовый расход абразива; f_k — площадь контакта струи; T_p — постоянная, учитывающая инерционность процесса микрорезания; ϵ_i — угол следования частицы после взаимодействия с оболочкой струи определяется углами α_i и ϕ_i .

Таким образом, стойкость σ_w материалов калибрующих трубок при гидроабразивном изнашивании является сложной функцией условий взаимодействия материала с абразивными частицами и средой [7]:

$$\sigma_w = (T; M_a; K_m; K_f; v_a; \alpha; \chi),$$

где T — продолжительность работы трубки; M_a — концентрация абразивных частиц в жидкости; d — размер частиц; K_m — коэффициент твердости, равный отношению твердости материала к твердости абразивных частиц; K_f — коэффициент, который характеризует форму частиц; v_a — скорость абразивных частиц в момент удара о поверхность трубки; 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.

Исходя из условий работы, геометрические параметры внутреннего профиля канала должны обеспечить следующие условия течения [8]:

- минимальную толщину пограничного слоя потока внутри трубки, турбулентного слоя исходящей свободной струи, которая уменьшается в толщине и снижает взаимодействие струи со средой;
- низкую вероятность отрыва пограничного слоя струи, способствующего уменьшению возбуждения ядра струи;
- снижение кавитационных явлений, исключение образования областей низких давлений внутри трубки во избежание развития питтингового разрушения трубки.

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

Приведенные в работах [9, 10] теоретические зависимости позволяют оценить влияние угла атаки на интенсивность изнашивания лишь качественно. Поэтому для анализа явлений, которые происходят в калибрующей трубке во время формирования абразивного-жидкостно-абразивного потока, был использован пакет прикладных программ FlowVision.

При моделировании ставилась задача выявления обусловленности эпюр нагружения на поперечном

срезе калибрующей трубки микрогеометрически-ми параметрами струйной эрозии, установления роли волновых процессов, возникающих в струе и приводящих к неравномерному изнашиванию трубки. Модель построена с учетом следующих допущений:

- все частицы, попадающие в камеру, далее поступают и в смесительную трубку;
- абразивно-струйный поток состоит из оболочки (аэрозольно-разорванный поток) и ядра;
- размеры ядра соответствуют существующим представлениям, а частицы могут попасть только в оболочку; волновыми процессами соударения частиц и капель воды пренебрегаем;
- в зависимости от точки попадания в оболочку, частица получает ускорение в том или ином направлении.

Каждая отдельная частица абразива массой m_a после вылета за срез трубки подачи абразива диаметром D_p со скоростями v_a , $v_a \in [v_{amin}; v_{amax}]$ попадает в поток жидкости за счет сил инерции, гравитационной составляющей, действия аэродинамического потока F_a , а при внедрении в поток воспринимает продольное p_a и поперечное p_{av} давления, а также гидродинамическое сопротивление движению F_c .

Для определения условий взаимодействия абразивных частиц с поверхностью канала произведено моделирование формирования и движения струйного потока в смесительной камере и калибрующей трубке. При этом во внимание была принята расчетная модель струйной системы, представленная на рисунке 2 а: диаметр проточной части смесительной камеры $D_c = 14,0$ мм, диаметр струйного сопла на срезе $d_s = 0,25$ мм, $D_{pa} = 4,0$ мм, $l_k = 70$ мм. Струя жидкости вытекает из сопла под давлением $p_b = 200$ МПа, попадает в канал трубки диаметром $D_k = 1,00$ мм. Частицы абразива массой $m_a = 1,2 \cdot 10^{-6}$ кг движутся с расходом 0,8 кг/хв. Расширение струи в пространстве камеры и калибрующей трубки определяется внешней поверхностью оболочки $w = 0,0335\sqrt{ld_s}$, в потоке существует продольное и поперечное давление, сам поток взаимодействует с массовым потоком частиц, а неразрывность потока как жидкой среды существует только до среза сопла d_s и выхода калибрующей трубки D_k .

Для установления направлений движения и координат попадания частиц в струю жидкости воспользовались программной средой MathCAD и определили закон распределения частиц по сечению для принятых конструктивных условий. Сгенерированный массив значений точек входа частиц в виде временного ряда вводился в модель потока, сформированного в FlowVision. Ядром пакета является блок численного решения уравнения движения жидкости в ортогональной системе координат (уравнение Навье–Стокса), 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:

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

где f_r, f_φ, f_z — напряжения массовых сил вдоль соответствующих осей r, φ, z ; v — кинематическая вяз-

кость; $\frac{\partial v_r}{\partial r}; \frac{\partial v_r}{\partial \varphi}; \frac{\partial v_r}{\partial z}; \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi}; \frac{\partial v_\varphi}{\partial z}; \frac{\partial v_z}{\partial \varphi}; \frac{\partial v_z}{\partial z}$ — 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.

Найденные значения напряжений массовых сил вдоль соответствующих осей при условии не-

разрывности $\frac{\partial(v_r r)}{\partial r} + \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + r \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$ позволяют опре-

делить массовую силу, которая действует на объем жидкости, который рассматривается:

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

где W — элементарный объем.

Начальные условия определяются геометрическим профилем соплового насадка, давлением жидкости p_b , ее 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:

$$F_c = \frac{18\mu\Delta w}{d_s^2}, \quad (3)$$

где μ — коэффициент расхода жидкости через сопло; d_s — диаметр трубки.

Для определения параметров системы была создана трехмерная модель области свободной струи. При модельных исследованиях была рассмотрена задача натекания струи жидкости из отверстия

сопла диаметром 0,24 мм на поверхность канала длиной 100 мм. Температура жидкости принималась равной 273 К, давление — 101 000 Па, плотность жидкости — 1000 кг/м³, частицы — SiO₂, расход — 0,8 кг/мин.

Результаты расчетов выведены в виде графика изменения скоростей и векторов движения частиц в смесительной камере и канале трубки (рисунок 3).

Полученные на рисунке 4 результаты расчета свидетельствуют о периодическом росте давления с амплитудой до 25,0 МПа и частотой $2 \cdot 10^{-6}$ с, что подтверждает наличие волновых процессов в самом теле струи и возможное изменение интенсивности износа вдоль оси. При этом установлено, что наиболее нагруженными с точки зрения абразивного изнашивания являются места входа жидкостно-абразивной смеси и на выходе из трубки (рисунки 3, 4). В этих зонах поперечное давление, вызванное волновыми процессами, максимально влияет на движущиеся частицы абразива.

По результатам моделирования построены гистограммы распределения частоты попадания частиц на поверхность калибрующей трубки в радиальном и осевом (близком к осевому) направлениях (рисунок 5).

Построение гистограмм позволило выделить вдоль калибрующей трубки три различные зоны с определенными функциональными свойствами: I — зона, в которой высока вероятность наличия радиальных векторов движения ускоренных частиц абразива; в ней происходит высокоинтенсивная ударная нагрузка стенок калибрующей трубки частицами, движущимися под углами, близкими к нормальным; II — зона, в которой можно ожидать движение частиц под углами, близкими к 45°, то есть зона, в которой будут максимально проявляться как явления ударного, так и скользящего разрушения; III — зона, в которой движутся практически направленные частицы, в ней можно ожидать преимущественно скользящее разрушение поверхности частицами по механизму микрорезания. Из представленных результатов очевидно, что максимальное повреждение трубки возможно в I и III



Рисунок 3 — Изменение скоростей и векторов движения частиц в смесительной камере и канале трубки

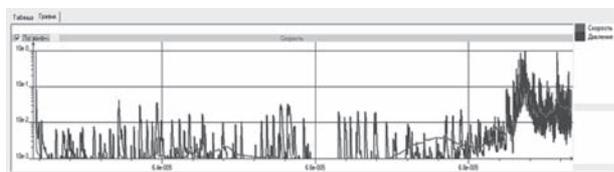
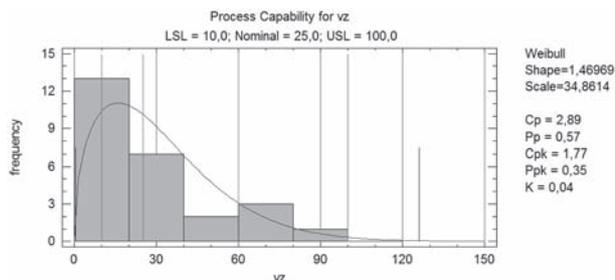
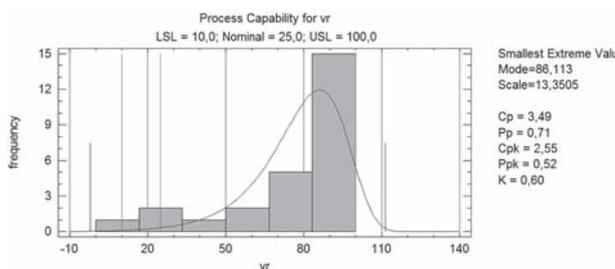


Рисунок 4 — Изменение скорости и давления при натекании струи на стенки калибрующей трубки



а



б

Рисунок 5 — Гистограммы частот и направлений движения абразивных частиц вдоль канала трубки

зонах, а зона II разрушается вследствие микроразрушения поверхности при касательном движении частиц.

Полученные результаты подтверждаются и результатами экспериментальных исследований. Для этого 15 предельно изношенных калибрующих трубок были разрезаны на электроэрозийном станке модели DKM280 с последующим измерением изменения радиуса канала с шагом $\Delta_b = 1,0$ мм на инструментальном микроскопе БМИ-1-Ц с точностью измерения 1 мкм. Данные обрабатывали с помощью статистического пакета Statgraphics Centurion.

Показано, что потеря работоспособности всех трубок происходит практически одинаково вследствие роста отверстия проточной части и искажения формы канала в продольном направлении (рисунок 6).

Поскольку наблюдался неравномерный износ канала с четко выраженной периодичностью

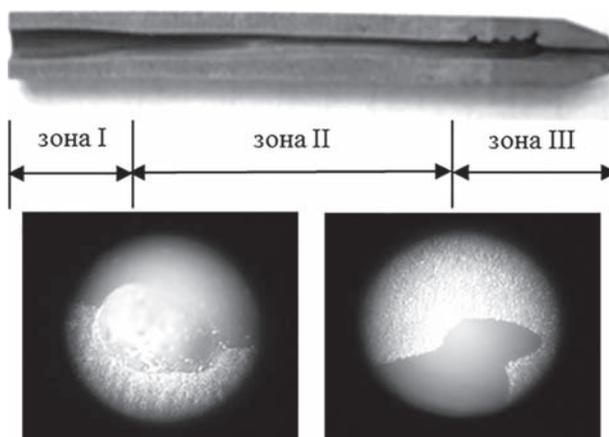


Рисунок 6 — Микрофотография изношенного канала трубки и его характерных повреждений, $\times 50$

(несмотря на то, что обработка материалов на гидрорежущих станках осуществлялась с различными режимами), сформулирована гипотеза о целесообразности формирования износостойкого покрытия в каждой отдельной функциональной зоне различной толщины, что соответствует реальному повреждению поверхности за время эксплуатации.

Для статистического описания профиля канала использован полином, отражающий волнообразный характер поверхности вида $r = b_0 + b_1y + b_2y^2 + \dots$, и получено регрессионное уравнение профиля канала трубки:

$$r = 0,5807 - 0,0049 \cdot y + 0,0008 \cdot y^2 - 0,0001 \cdot y^3 + 6,679 \cdot 10^{-7} \cdot y^4 - 4,043 \cdot 10^{-9} \cdot y^5. \quad (4)$$

Установленная волнообразность коррелирует с полученными в результате моделирования функциональными зонами, а средняя длина волны составляет $\lambda_c = 20,0 - 25,0$ мм.

Образование сквозных или критических разрушений на канале наблюдается преимущественно на последнем участке трубки, то есть в условиях, когда зерна абразива имеют максимальную скорость движения.

Таким образом, картина повреждения трубки отвечает полученным при моделировании параметрам эпюры давления как в продольном, так и в поперечном сечении соплового канала.

Поскольку калибрующая трубка воспринимает гидродинамические и механические нагрузки от действия высокоскоростных частиц абразива, введенных в поток жидкости за срезом сопла, изнашивание проявляется в увеличении диаметра калибрующего отверстия D_k свыше установленного предельного размера, а также в наличии скалываний кромки, вследствие чего меняется геометрия сформированной канавки реза (рисунок 7) и возникают дефекты обработки (рисунок 8), причем изменение параметров реза происходит по законам, близким к линейным.

$$\delta_k = 0,2975 + 15,445\delta_n; t_0 = 6,325 > [t]; R = 0,954; \quad (5)$$

$$D_r = 0,123 + 6,98\delta_n; t_0 = 4,79 > [t]; R = 0,897. \quad (6)$$

Отличие механизмов взаимодействия абразивных частиц с поверхностью вдоль канала трубки и условие обеспечения приблизительно одинаковой низкой скорости эрозии, учитывая современное развитие функционального подхода, освещено в работах О. Михайлова ([11], [12] и др.) и позволяет сделать вывод о наличии на поверхности четко детерминированных функциональных макрозон, отличительные свойства которых требуют различных средств обеспечения функций как материальных носителей.

Такими средствами могут стать соответствующие покрытия, которые удовлетворительно будут воспринимать тот или иной вид абразивного воздействия. Тем не менее наиболее сложной проблемой является нанесение покрытий на поверхность канала трубки, размеры которого от 4,2 мм на входе трубки и до 0,95–1,20 мм на ее срезе.

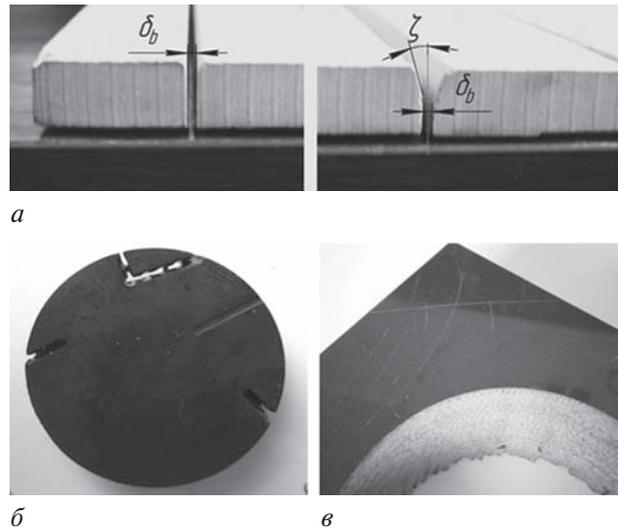


Рисунок 7 — Рост ширины реза (материал — мраморная плита) (а), появление зон неполного прорезания (материал — CBN) (б) и существенные нарушения точности формы (материал — стеклотекстолит) (в), связанные с изменением энергетических параметров струи при износе калибрующей трубки

Применение морфологического анализа и составление матрицы вариантов выполнения трубки показало, что данная проблема может быть решена путем инверсирования внутренней поверхности (поверхности канала) в две (или более) наружных, полученных на разделенных на две симметричные части полутрубках с последующим упрочнением износостойкими покрытиями. Полученные полутрубки в дальнейшем совмещаются в одно целое бандажом.

Для решения вопроса относительно целесообразности использования определенных покрытий выполнен комплекс испытаний образцов на гидроабразивную стойкость размером 40×10×5 мм из твердого сплава ВК 8, который является основным материалом для изготовления элементов систем гидроабразивной обработки как без покрытия, так и с вакуум-плазменным покрытием TiN, с азотированным слоем N; комбинированным покрытием из азотированного слоя и TiN (N+TiN) и с покрытиями, полученными методом электроконтактного припекания ПГ-С1, ФМИ-2.

В результате исследований определялись глубина повреждения слоя $h = f(t, \alpha, v_a)$ и объем удаленного материала $W_p = f(t, \alpha, v_a)$. При этом исхо-

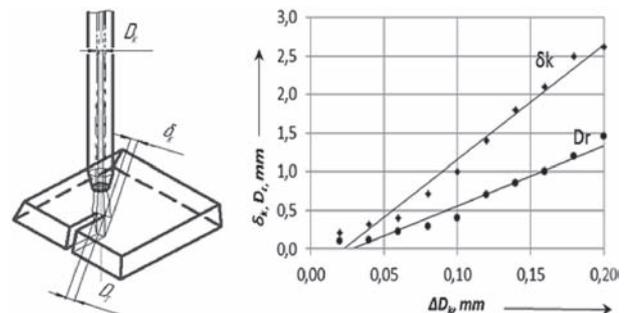


Рисунок 8 — Функциональная обусловленность погрешностей реза δ_k и D_r , уровнем износа канала трубки ΔD_k

дили из условия, что распределение скорости потока на выходе из калибрующей трубки, а, следовательно, и запас кинетической энергии каждой абразивной частицы как случайной величины подчиняется закону Гаусса; в самом канале калибрующей трубки энергия потока постепенно передается частицам, пропорционально их движению вдоль оси, то есть $v_a = f(z)$.

Разработана методика анализа повреждений канала калибрующих трубок. Поскольку разрушение материала пропорционально кинетической энергии (то есть скорости движения и весу абразивной частицы m_a), очевидно, что объем снятого с поверхности образца за время τ материала будет значительно большим по сравнению с режимами, в которых калибрующая трубка работает. Таким образом, в реальных условиях объем удаленного материала W_k определяется, исходя из уравнения:

$$W_k = c_1 \left(\frac{v_{pt}}{v_f} \right)^2 \frac{N_{pt}}{N_f} W_e, \quad (7)$$

где v_{pt} , v_f — фактическая в канале и определенная экспериментально у поверхности образца скорость частиц, м/с; N_{pt} , N_f — количество частиц, контактирующих с поверхностью канала трубки и с опытным образцом соответственно; W_e — объем материала, изъятый из образца, мм³. Скорость разрушения поверхности калибрующей трубки будет меньше скорости разрушения, определенной взвешиванием образца до обработки (m_2) продолжительностью t_0 и после нее (m_0), и составит:

$$\omega_k = R\omega_e; \quad R = c_1 \left(\frac{v_{pt}}{v_f} \right)^2 \frac{N_{pt}}{N_f}; \quad \omega_e = \frac{m_z - m_0}{t}. \quad (8)$$

С учетом принятого периода стойкости калибрующей трубки T , мин, при условии равномерного и одновременного повреждения поверхности всех функциональных зон, предложено условие для определения требуемых толщин покрытий:

$$\frac{h_1^2}{\omega_1} l_1 = \frac{h_2^2}{\omega_2} l_2 = \frac{h_3^2}{\omega_3} l_3 = T, \quad (9)$$

где h_i — толщины соответствующих типов покрытий.

Для проведения серии экспериментов по выявлению наиболее целесообразных видов покрытий для разных функциональных зон использовали лазерно-струйный станок ЛСК-5-400, на котором установлено устройство с поворотной платформой для закрепления исследуемых образцов под заданными углами (рисунок 9).

Условия обработки были следующими: $D_k = 1,0$ мм, $p_b = 250$ МПа, абразивные частицы — гранатовый песок фракцией 0,05/0,1 мм, расход частиц — 0,6 кг/мин, $d_s = 0,22$ мм, режимы получения покрытий приведены в таблице 1. В результате были получены регрессионные уравнения повреждения покрытий в функции времени, а также уравнения, устанавливающие влияние угла натекания на интенсивность разрушения,

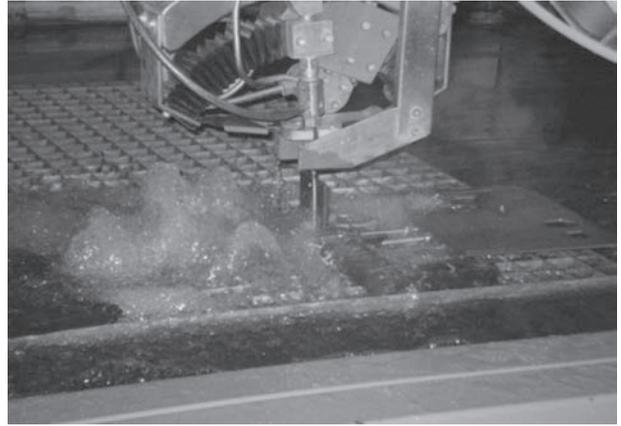


Рисунок 9 — Установка исследуемого образца на рабочий стол гидрорежущей машины ЛСК-400-5

что позволило оценить возможность использования покрытий в конкретных функциональных зонах. Зависимость степени повреждения покрытий в виде глубины лунки h , образующаяся на поверхности в течение текущего времени t , представлена на диаграммах рисунка 10.

Установлено, что образцы с комбинированным покрытием N + TiN оказались наиболее устойчивыми к жидкостно-абразивному и кавитационному износу по сравнению с TiN (их период стойкости превышал TiN почти в 3 раза). Износ происходил равномерно, без образования участков отслоения.

Образцы с покрытием ПГ-С1 изнашивались также менее интенсивно по сравнению с образцами без покрытия, повреждения достигли максимума через 81 с, что соответствует стойкости в трубке порядка 14,2 ч. После этого на образцах стали наблюдаться зоны активного отслоения покрытия. Механизм разрушения покрытия TiN был аналогичным: частичное повреждение, отслоение и активное разрушение материала основы.

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

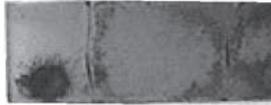
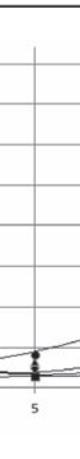
Образцы с покрытием ФМИ 2 были наиболее устойчивыми к абразивно-жидкостному и кавитационному износу, интенсивное разрушение наблюдалось после 2,5 мин (соответствие — 25,3 ч). Износ происходил достаточно равномерно, без образования областей отслоения, сколов и трещин.

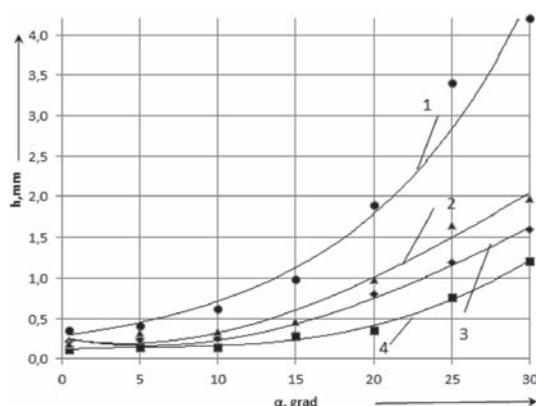
Влияние угла натекания струи на скорость съема покрытия определяли путем измерения внедрения струи в исследуемый образец за время, равное 1,0 мин.

Измерения осуществляли в диапазоне углов от $3^\circ (\pi/60)$ до $30^\circ (\pi/6)$ (дальнейшее увеличение углов приводит к полному разрушению покрытия и основанию и получения паза около 3–4 мм).

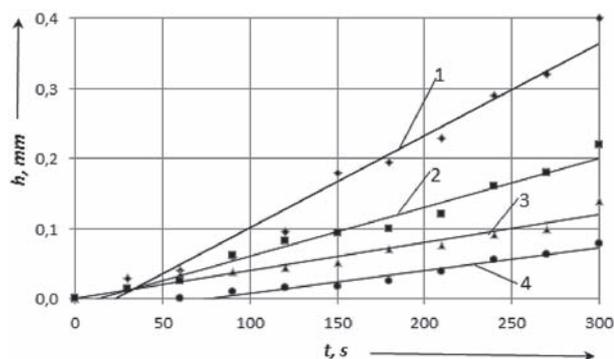
В результате пересчета данных по (7) установлено ожидаемое снятие поверхностного слоя на

Таблица 1 — Результаты испытаний опытных образцов с различными износостойкими покрытиями на устойчивость к гидроабразивному повреждению

Покрытия, режимы осаждения	Микрофотография	Вид дефекта
TiN		Неравномерный износ покрытия, трещины
Давление $p = 2,2 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., ток дуги $I_d = 100$ А, температура $T = 250$ °С, напряжение $U = 500$ В, время осаждения $t = 40$ мин		
N		Дефекты не обнаружены, износ происходит равномерно, без областей отслаивания
Давление $p = 100$ МПа, ток дуги $I_d = 100$ А, температура $T = 250$ °С, напряжение $U = 500$ В, время осаждения $t = 40$ мин		
N+ TiN		Дефекты не обнаружены, износ происходит равномерно, без областей отслаивания
Давление $p = 100$ МПа, ток дуги $I_d = 100$ А, температура $T = 250$ °С, напряжение $U = 500$ В, время осаждения $t = 40$ мин; ток дуги $I_d = 100$ А, температура $T = 250$ °С, напряжение $U = 500$ В, время осаждения $t = 40$ мин		
ПГ-С1		Зоны отслаивания, скалываний
Давление $p = 100$ МПа, сила тока $I = 8-30$ кА, вторичное напряжение $U = 1-6$ В, время импульса $t = 0,04-0,2$ с, скорость нагрева $V = 10^3-10^4$ К/с, скорость припекания $w = 25-35$ мм/с		
ФМИ-2		Дефекты не обнаружены, износ происходит равномерно, без областей отслаивания
Давление $p = 100$ МПа, сила тока $I = 8-30$ кА, вторичное напряжение $U = 1-6$ В, время импульса $t = 0,04-0,2$ с, скорость нагрева $V = 10^3-10^4$ К/с, скорость припекания $w = 25-35$ мм/с		



а



б

Рисунок 10 — Сравнительные диаграммы износа покрытий в зависимости от угла натекания (а) и времени обработки (б): 1 — TiN; 2 — ПГС 1; 3 — N + TiN; 4 — ФМИ 2

канале калибрующей трубки, которая представлена в таблице 2.

Таким образом, обоснована целесообразность использования калибрующих трубок принципиально новой конструкции как многокомпонентного изделия из основания и износостойких покрытий. Износостойкая калибрующая трубка для формирования абразивно-жидкостной режущей струи была изготовлена из двух симметричных частей, объединенных между собой механически, в частности, охваченных 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 воздействия потока нанесен износостойкий фрагментарный слой, который представляет собой адгезионную пленку из материалов, интенсивность изнашивания которых для различных условий одинакова, причем длина нанесения слоя (его фрагмента) соответствует длине участка с конкретным видом воздействия абразивных частиц (рисунок 11).

Таблица 2 — Ожидаемая стойкость поверхностного слоя канала калибрующей

Покрытие	Длина участка канала l , мм	Ожидаемый угол натекания α , °	Ожидаемая скорость v , м/с	Элемент поверхности	Толщина слоя h_{max} , мм	Стойкость слоя до полного изнашивания t , хв	Регрессионные уравнения (коэффициент корреляции 0,96)
N+TiN	$l_1 = 5-15$	30-35	5-15	E_{21}	—	—	—
	$l_2 = 30-55$	9-12	40-50	E_{22}	0,208	103,5	$h(t) = (0,1802 + 0,0027t)^2$ $h(\alpha) = \exp(-2,2446 + 0,0732\alpha)$ $W(t) = (-0,1488 + 0,0072t)^2$ $W(\alpha) = \exp(-2,9875 + 0,2322\alpha)$ $h(v) = 0,0151 + 0,016\sqrt{v}$
	$l_3 = 55-70$	3-9	140-150	E_{23}	—	—	—
ФМИ2	$l_1 = 5-15$	30-35	5-15	E_{21}	1,500	(не лимитирован)	$h(t) = (0,0002 + 0,0050t)^2$ $h(\alpha) = \exp(-1,9376 + 0,0811\alpha)$ $W(t) = \exp(-8,6890 + 0,2341t)^2$ $W(\alpha) = \exp(-8,4267 + 0,0354\alpha)$ $h(v) = -0,0877 + 0,034\sqrt{v}$
	$l_2 = 30-55$	9-12	40-50	E_{22}	—	—	—
	$l_3 = 55-70$	3-9	140-150	E_{23}	1,500	237,0	$h(t) = (0,0002 + 0,0050t)^2$ $h(\alpha) = \exp(-1,9376 + 0,0811\alpha)$ $W(t) = \exp(-8,6890 + 0,2341t)^2$ $W(\alpha) = \exp(-8,4267 + 0,0354\alpha)$ $h(v) = -0,0775 + 0,0332\sqrt{v}$

Опытные образцы представляли собой трубки, изготовленные из регенерированного твердого сплава группы ВК. На поверхность канала нанесли методом электроконтактного припекания ФМИ-2 толщиной 1,5 мм (фракционный состав 30/50 мкм) в зоне l_1 , PVD-покрытие TiN с предыдущим упрочнением методом ионно-плазменного термоциклического азотирования в зоне l_2 , покрытие ФМИ-2 в зоне l_3 и PVD-покрытием с предыдущим азотированием на торце трубки (N + TiN). Толщина азотированного слоя — 200 мкм, покрытие TiN — 8 мкм. По нашему мнению, примененные фрагментарного слоя рациональнее, чем из-

готовление всей трубки из более износостойкого, но и более дорогостоящего материала.

После испытаний опытных образцов получены реальные профили изнашивания. Профилограмма получена после установленного срока эксплуатации ($T = 10,0$ ч) для 10 калибрующих трубок с нанесенными фрагментарными слоями (рисунок 12).

Нанесение соответствующих покрытий на зоны калибрующей трубки, которые наиболее подвержены ударно-абразивному действию двухфазного абразивно-жидкостного потока, значительно уменьшает скорость эрозии канала трубки, обеспечивая тем самым стабильность характеристик потока и его высокую энергетическую эффективность в течение длительного времени.

Неполное нанесение покрытия на внутреннюю поверхность калибрующей трубки ведет к выравниванию скоростей износа отдельных участков,

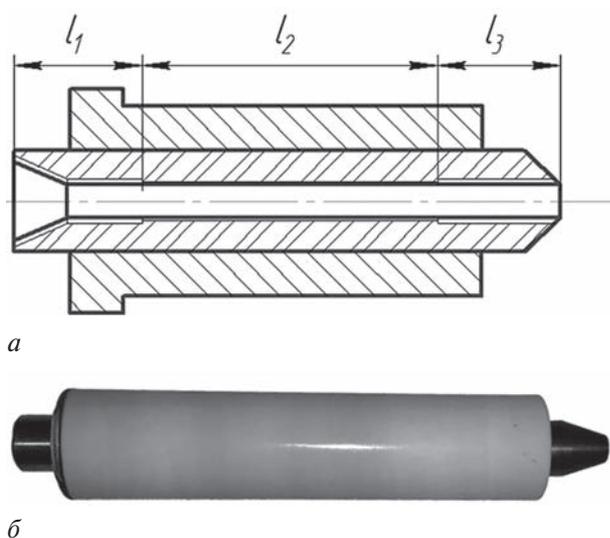


Рисунок 11 — Эскиз предлагаемого технического решения трубки (а) и фото изготовленного образца (б)

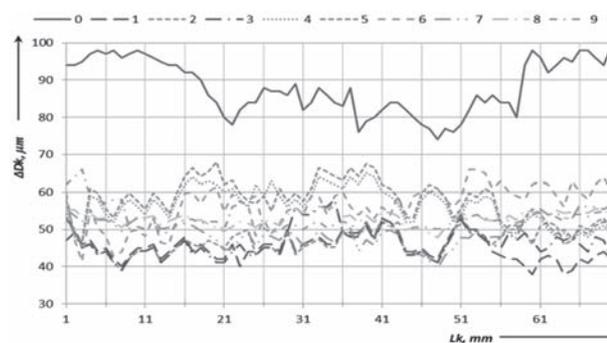


Рисунок 12 — Профили изнашивания канала после 10 ч работы трубки: 0 — профиль изношенного канала трубки без покрытия; 1-9 — профили изношенных каналов с фрагментарным покрытием

обусловленных волновыми явлениями в струе, что позволяет максимально долго сохранять геометрическую правильность формы канала и поддерживать режущую способность струи.

Результаты измерений показали, что нанесенные покрытия надежно защищают канал трубки. Так, удалось избежать возникновения зародышей интенсивного разрушения на поверхности канала; однако более выразительными стали места стыковки различных слоев по длине канала, а слой PVD-покрытие с азотированием (N + TiN) в 200 мкм оказался практически удаленным. Тем не менее, развитие повреждения канала происходило практически без нарушения исходной диаметральной части, довольно равномерно.

Таким образом, можно констатировать, что по сравнению с другими средствами снижения интенсивности изнашивания, представленными в работах [13], [14], предложенное решение оказалось действенным и эффективным.

В то же время нуждаются в дальнейшем анализе варианты выполнения слоев, а в перспективе — способы инверсного создания калибрующей трубки, то есть наращивание требуемых слоев от канала (выполненного из материала, который потом может быть легко удален) к внешней поверхности. В этом случае можно говорить о формировании такого поверхностного слоя канала, при котором нитридные или карбидные соединения могут быть ориентированы с учетом снижения гидравлического сопротивления движущейся среде, для чего целесообразно привлечение средств Rapid Prototyping.

Сейчас ведутся дальнейшие работы с заменой регенерированного твердого сплава более дешевым материалом. При этом, по нашему мнению, выявленные закономерности и подходы могут быть использованы в любых ответственных струйных устройствах.

Выводы. Построенная модель течения двухфазной высокоскоростной гидроабразивной режущей струи в проточной части калибрующей трубки позволила предположить, а в последствии и экспериментально доказать существование определенных зон, в которых процессы повреждения канала отличаются механизмом. Это дало возможность использовать функциональный подход к созданию новой конструкции трубки, которая предусматривает существование фрагментарных функциональных слоев на поверхности канала. Выполненные экспериментальные испытания предлагаемых типов калибрующих трубок доказали их высокую эффективность, поскольку нанесение функционального покрытия позволяет уменьшить скорость износа, тем самым повысить срок эксплуатации трубки до прогнозируемого отказа.

Гарантированная стойкость калибрующих трубок предлагаемого типа превышает стойкость обычных трубок в среднем в 1,6–1,8 раза и составляет около 16,2–17,5 ч, при этом рассеивание периодов составляет 10–12 %.

Получены функциональные зависимости изнашивания покрытий в канале калибрующей трубки по критериям гидроабразивной стойкости дополняют общую методологическую информационную базу и безусловно содействуют разработке принципа управления свойствами поверхностного слоя.

Список литературы

1. Hashish, M. Cutting and Drilling at 690-MPa Pressure / M. Hashish // Proc. of the 10th American Waterjet Conference, Houston, Texas, 14–17 Aug. 1999. — Houston, 1999. — Pp. 152–166.
2. Саленко, О.Ф. Перспективы ринку обладнання для листової обробки / О.Ф. Саленко, О.В. Фомовська // Вісн. КДПУ. — 2008. — № 6(48). — С. 45–50.
3. Дудюк, В.О. Аналіз динамічного навантаження елементів зони гідро різання із використанням прикладного пакету Flow Vision / В.О. Дудюк // Вісн. КНУ ім. М. Остроградського. — 2010. — № 6(65). — С. 59–62.
4. Khorolska, M. Increase of compactness of hydroabrasive jet and reliability of cutting process while using functional coatings on jet elements / M. Khorolska, O. Salenko, V. Schetyinin // Journal of the Technical University of Gabrovo. — 2013. — Vol. 46. — Pp. 36–43.
5. Salenko, O. Improvement of the fracture resistance of calibration tubes of the hydroabrasive equipment / O. Salenko, M. Khorol'ska // Materials Science. — 2015. — Vol. 50, Is. 6. — Pp. 861–869.
6. Повышение работоспособности элементов гидрорежущих устройств с помощью функционально-ориентированного подхода / М.С. Хорольская [и др.] // Вест. Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. — 2014. — № 11. — С. 65–74.
7. Непомнящий, Е.Ф. Трение и износ под воздействием струи твердых частиц / Е.Ф. Непомнящий // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа: сб. статей. — М.: Наука, 1971. — С. 190–200.
8. 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., ил.
9. Цыгановский, А.Б. Определение степени влияния угла атаки струи на производительность и качество гидроабразивной обработки затопленными струями / А.Б. Цыгановский // Вісн. СНУ ім. В. Даля. — 2009. — № 6. — С. 220–228.
10. Проволоцкий, А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей / А.Е. Проволоцкий. — Киев: Техника, 1989. — 177 с.
11. Михайлов, А.Н. Разработка технологий на основе функционально-ориентированного подхода / А.Н. Михайлов. — Донецк: ДонНТУ, 2008. — 450 с., ил.
12. Михайлов, А.Н. Методика и основные принципы синтеза функционально-ориентированных вакуумных ионно-плазменных покрытий изделий машиностроения / А.Н. Михайлов, В.А. Михайлов, Е.А. Михайлова // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2005. — № 7. — С. 3–9.
13. Сичук, В.А. Нові принципи конструювання і виготовлення сопел для абразивоструменевих машин / В.А. Сичук, О.В. Заболотний // Наук. вісн. Херсонської держ. морської академії. — 2012. — № 1(6). — С. 317–321.
14. Anand Umang Prevention of nozzle wear in abrasive water suspension jets (AWSJ) using porous lubricated nozzles / Anand Umang, J. Katz // Journal Tribology. — 2003. — Pp. 168–180.

SALENKO Aleksandr F., Dr. Techn. Sc., Professor

Head of the Department of Processes and Equipment for Mechanical and Physical-Technical Processing¹

E-mail: Salenko2006@ukr.net

KHOROLSKAYA Marianna S.

Assistant of the Department of Processes and Equipment for Mechanical and Physical-Technical Processing¹

E-mail: mariannamax@yandex.ru

LYASHENKO Boris A., Dr. Techn. Sc., Professor

Head of the Laboratory of Surface Hardening of Structural Elements²

E-mail: coating@ipp.kiev.ua

LOPATA Larysa A., Cand. Techn. Sc.

Senior Researcher²

E-mail: beryuza@ukr.net

¹Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine

²G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

Received 24 November 2015.

INCREASE RESISTANCE WATERJET FORMING ELEMENTS BASED ON FUNCTIONAL-ORIENTED APPROACH

The paper gives the results of research to improve the stability of the jet-forming elements waterjet systems by using a number of special coatings, shape and location of the application are installed on the basis of function-oriented approach. The influence of parameters destroyed gauge tube as jet forming elements is the quality of the process of waterjet cutting of critical parts. The results of modeling the formation of two-phase flow and its movement in the gauge tube. It has been determined that the phenomena of wear of the hydraulic pipes have different intensities and mechanism. This determines the feasibility of function-oriented approach to the choice of means to ensure the required parameters of the element. It is concluded that the decrease in the intensity of material removal with the running of the tube and thus maintain its geometric parameters is possible through the use of appropriate coatings, thickness and physical-mechanical characteristics are selected based on the functional-cost features in accordance with an intensity and a view of the abrasive surface load.

Keywords: waterjet cutting, calibration tube, protective layers, functional-oriented approach

References

1. Hashish M. Cutting and Drilling at 690-MPa Pressure. *10th American Waterjet Conference August 14–17, 1999*. Houston, Texas, pp. 152–166.
2. Salenko O.F., Fomovska O.V. Perspektivy rynku obladnannya dlya lystovoyi obrobky [Prospects for market equipment for sheet handling]. *Visnyk KDPU* [Transactions of Kremenchuk State Politechnical University], 2008, no. 6(48), pp. 45–50.
3. Dudyuk V. O. Analysis of the dynamic load of waterjet cutting zone elements with flow vision application packet [Analysis of dynamic loading of items of zone of hydrocutting using application package Flow Vision]. *Visnyk KrNU* [Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University], 2010, no. 6(65), pp. 59–62.
4. Khorolska M., Salenko O., Schetyinin V. Increase of compactness of hydroabrasive jet and reliability of cutting process while using functional coatings on jet elements. *Universitetskoe izdatel'stvo Gabrovo*, 2013, vol. 46, pp. 36–43.
5. Salenko O., Khorolska M. Improvement of the fracture resistance of calibration tubes of the hydroabrasive equipment. *Materials Science*, 2015, vol. 50, Issue 6, pp. 861–869.
6. Khorolskaya M. [et al.] Povyshenie rabotosposobnosti jelementov gidrorezhushchih ustrojstv s pomoshh'ju funkcional'no-orientirovannogo podhoda [Using a functional approach in solving problems improve performance waterjet equipment]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Herald of Polotsk State University, Series B. Industry. Applied Sciences], 2014, no. 11, pp. 65–74.
7. Nepomnyashiy E.F. Trenie i znos pod vozdeystviem strui tverdyh chastic [Friction and wear under the influence of the jet particles]. *Kontaktnoe vzaimodejstvie tverdyh tel i raschet sil trenija i znosna* [Contact interaction of solids and calculate the forces of friction and wear], 1971, Moscow, Nauka, pp. 190–200.
8. Stepanov V.S., Barsukov G.V. *Sovremennye tehnologicheskie processy mehanicheskogo i gidrostrujnogo raskroja tehniceskikh tkanej. Biblioteka tehnologa* [Modern technological processes of mechanical and technical hydrojet of technical fabrics. Library of technologist]. Moscow, Mashynostroenie, 2004. 240 p.
9. Tsygankovskiy A.B. Opredelenie stepeni vlijanija ugla ataki strui na proizvoditel'nost' i kachestvo gidroabrazivnoj obrabotki zatoplennymi strujami [Determining of the degree of influence of the angle of attack jet on productivity and quality of waterjet processing submerged jets]. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University [Visnyk SNU named by V. Dal]*, 2009, no. 6, pp. 220–228.
10. Provolotskiy A.E. *Strujno-abrazivnaja obrabotka detalej* [Jet-abrasive treatment of details]. Kyiv, Tehnica, 1989. 177 p.
11. Mykhaylov A.N. *Razrabotka tehnologij na osnove funkcional'no-orientirovannogo podhoda* [Development of technologies based on the function-oriented approach]. Donetsk, DonNTU, 2008. 450 p.
12. Mykhaylov A.N., Mykhaylov V.A., Mykhaylova E.A. Metodika i osnovnye principy sinteza funkcional'no-orientirovannyh vakuumnyh ionno-plazmennyh pokrytij izdelij mashynostroeni [Technique and the basic principles of synthesis of function-oriented vacuum ion-plasma coatings engineering products], *Mashynostroenie* [Mechanical Engineering], 2005, no. 7, pp. 3–9.
13. Sychuk V.A., Zabolotniy O.V. Novi principy konstruiuvannya i vivotovlennja sopel dlja abrazivostrumeneviih mashin [New principles of designing and manufacturing nozzles for waterjet machines]. *Naukovij visnik Hersons'koi derzhavnoi mors'koi akademii* [Scientific Bulletin Kherson State Maritime Academy], 2012, no. 1(6), pp. 317–321.
14. Anand Umang, Katz Joseph. Prevention of nozzle wear in abrasive water suspension jets (AWSJ) using porous lubricated nozzles. Baltimore, *The Johns Hopkins University*, 2003, pp. 168–180.