

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОМЫВКИ ТРУБОПРОВОДОВ ГИДРО- И ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ САМОЛЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

© 2013 А.А. Федоров, Н.В. Кабанов

Ульяновский государственный технический университет

Поступила в редакцию 26.09.2013

Рассмотрена возможность ультразвуковой промывки трубопроводов. Обоснована эффективность данного вида очистки. Предложена конструкция ультразвуковой установки для осуществления процесса очистки гидро- и топливных систем самолета.

Ключевые слова: ультразвук, разработка, очистка, технология, кавитация.

Современная техника предъявляет повышенные требования к качеству очистки технологических поверхностей. Недостаточно хорошая очистка отрицательно сказывается на надежности и долговечности деталей, ускоряет износ, ухудшает адгезию защитных и других функциональных покрытий.

Достоинства ультразвукового метода промывки:

- создает возможность быстрой и высококачественной очистки;
- обработки изделий сложной конфигурации;
- в ряде случаев позволяет удалить загрязнения, не поддающиеся удалению другими методами.

Ультразвуковой способ отличает низкая энергоемкость, возможность автоматизации процесса, использование менее концентрированных моющих растворов.

Чтобы понять *технология ультразвуковой очистки*, прежде всего, необходимо разобраться: что же такое собственно *ультразвук (УЗ)*? Ультразвуком обычно называют упругие колебания и волны с частотами приблизительно 17-20 кГц.

При воздействии ультразвука происходит процесс механического разрушения пленки загрязнений с одновременным ускорением процесса химического взаимодействия моющей среды с загрязнением.

Ультразвуковое поле в жидкости характеризуется в классической акустике звуковым давлением и интенсивностью колебаний, определяемыми из выражений [1]:

$$P_{зв} = \rho c \omega \xi \cos(\omega t - kx) = P_m \cos(\omega t - kx); \quad (1)$$

$$J = P_m^2 / 2\rho c, \quad (2)$$

где $P_m = \rho c \omega \xi$ – амплитуда звукового давления; ρc – волновое сопротивление среды; ω – частота; ξ – амплитуда колебаний; J – интенсивность звукового поля.

Распространение ультразвуковых колебаний вызывает в жидкости ряд явлений – кавитация, акустические потоки, радиационное давление. Эти явления оказывают основное физическое воздействие на процесс ультразвуковой очистки, они же усиливают химическое взаимодействие моющей жидкости с загрязнениями [1].

Эффекты ультразвуковой обработки в большей степени являются результатом ультразвуковой *кавитации* в жидкостях. При воздействии мощного ультразвукового излучателя на жидкость в ней наблюдается возникновение кавитации, которая характеризуется ростом пузырьков воздуха. Живут такие пузырьки, как правило, очень недолго. Пузырек вырастает до некоторого максимального размера и захлопывается.

Пузырек, захлопываясь, создает ударные волны большой силы – *импульсы давления*, достигающие нескольких тысяч атмосфер. Такие высокие ударные давления вызывают сильные кавитационные разрушения на поверхности твердых тел, ведущие к отрыванию прилипших к очищаемой поверхности частиц загрязнений. Величина максимального ударного давления P определяется из выражения, связывающего его с давлением газа в пузырьке P_r , давлением в жидкости P_0 и отношением теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме ($k = c_p / c_v$):

$$P = P_r [(k - 1)P_0 / P_r]^{k/k-1}, \quad (3)$$

Кавитационные пузырьки, возникшие в ультразвуковом поле, различны по размерам, их диаметры колеблются от 0,01 до 1,0 мм. Этим размерам соответствуют собственные резонансные частоты пузырьков от 600 до 6 кГц. Максимальный резонансный размер пузырьков определяется формулой [2]:

Федоров Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры “Самолетостроение”.

E-mail: avia@ulstu.ru

Кабанов Николай Владимирович, студент кафедры “Самолетостроение”.

$$f = \frac{1}{2\pi R_p} \sqrt{\frac{3k}{\rho} \left(P_{ст} + \frac{2\sigma}{R_p} \right)}, \quad (4)$$

где R_p – резонансный размер пузырьков; $P_{ст}$ – гидростатическое давление; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Наиболее интенсивные импульсы давлений создают пузырьки, собственные частоты которых вблизи или кратны частоте возбуждающего поля. Пузырьки участвуют в кавитационных процессах, если их радиус меньше критического $R_{кр}$ при данном гидростатическом давлении $P_{ст}$. Величина $R_{кр}$ определяется из выражения [2]:

$$R_{кр} = \sqrt{3} R_0 \sqrt{\frac{R_0}{2\sigma} \left(P_{ст} - P_n + \frac{2\sigma}{R_0} \right)}, \quad (5)$$

где P_n – давление насыщенных паров; R_0 – начальный размер пузырька.

Процесс кавитации характеризуется интенсивным шумообразованием – характерным “шипением” при работе ультразвуковой ванны.

Помимо кавитации, большую роль в очистке играют также *акустические течения*. Под акустическими течениями понимают вихревые потоки, образующиеся в жидкости, под действием ультразвуковых колебаний.

Из акустических течений наибольший интерес представляют течения в пограничном к твердой поверхности слое и вблизи него, так как в тонком пограничном слое градиент скорости велик, а силы, возникающие в нем, значительно увеличены по сравнению с силами в свободном звуковом поле [3].

Акустические потоки способствуют также лучшему обмену раствора в зоне очистки, уносу загрязненного раствора, поступлению свежей порции раствора, а так же доставляют технологически активные кавитационные пузырьки к участкам очищаемой поверхности.

Действующее в ультразвуковом поле *радиационное давление* возникает в результате того, что переносимый волной средний импульс энергии изменяется в пространстве. Радиационное давление обнаруживается визуально в эффекте фонтанирования.

Исследования показали, что в зависимости от вида загрязнения преобладающую роль в очистке играют различные процессы. Так, разрушение слабо взаимосвязанных загрязнений происходит, в основном, под действием пульсирующих (незахлопывающихся) кавитационных пузырьков. На краях пленки загрязнений пульсирующие пузырьки, совершая интенсивные колебания, преодолевают силы сцепления пленки с поверхностью, проникают под пленку, разрывают и от-

слаивают ее. Радиационное давление способствует проникновению моющего раствора в микропоры, неровности и глухие каналы. Акустические течения осуществляют ускоренное удаление загрязнений с поверхности. Если же загрязнения прочно связаны с поверхностью, то для их разрушения и удаления с поверхности необходимо наличие захлопывающихся кавитационных пузырьков, создающих микроударное воздействие на поверхность.

Основными *физическими факторами, влияющими на ультразвуковую очистку*, являются [1]:

- *Частота колебаний* – её увеличение приводит к уменьшению размеров пузырьков за счет сокращения времени их роста. При этом интенсивность ударных волн с повышением частоты падает. С повышением частоты к. п. д. преобразователя и излучаемая им мощность значительно падают. Использование частот выше 44 кГц для целей очистки вряд ли можно считать целесообразным. Применение низких частот нецелесообразно, так как эффективность очистки падает за счет появления в жидкости крупных пульсирующих пузырьков, которые не создают мощных импульсов давления;

- *Звуковое давление* оказывает значительное влияние на пульсацию и рост кавитационных пузырьков. С увеличением звукового давления повышается время роста и захлопывания кавитационных пузырьков. Увеличивается число пульсирующих пузырьков, растет и объем кавитационной области, так как все большее количество кавитационных зародышей с повышением давления начинает участвовать в кавитационных процессах.

- *Интенсивность ультразвукового поля* связана со звуковым давлением соотношением (2). Под интенсивностью ультразвукового поля понимают мощность, приходящуюся на единицу площади излучателя. Очистка происходит тем эффективнее, чем ближе они находятся к излучающей поверхности преобразователя.

- *Статическое давление* – при определенном соотношении между звуковым p_A и статическим p_0 давлениями, равным для воды $p_0 / p_A = 0,4$, можно значительно увеличить кавитационную эрозию.

Повышенное давление в замкнутом рабочем объеме может быть достигнуто подачей сжатого воздуха, инертного газа или путем прокачки моющей жидкости. Недостатками при использовании повышенного статического давления являются уменьшение количества кавитационных пузырьков и сужение области кавитации.

- *Плотность жидкости* – её повышение затрудняет образование кавитационных пузырьков в связи с увеличением присоединенной массы

жидкости. Поэтому уменьшаются количество кавитационных пузырьков и их радиус.

• *Вязкость жидкости* – это влияние двояко. С одной стороны, повышение вязкости приводит к увеличению потерь ультразвуковой энергии на вязкое трение, уменьшается скорость течения в пограничном слое. С другой стороны, более вязкая жидкость уменьшает максимальный радиус пузырька, сдвигает фазу захлопывания, сокращает время захлопывания, увеличивает силу ударной волны при захлопывании. С увеличением вязкости возрастает активная нагрузка на преобразователь, что может привести к изменению вводимой в объем акустической мощности.

• *Давление парогазовой смеси*, равной сумме парциальных давлений водяного пара и газа (воздуха) имеет большое значение для эффективности очистки. Пульсации кавитационных пузырьков сопровождаются их периодическими растяжением и сжатием. В фазе растяжения, создаются условия для диффузии газа из жидкости в пузырек, и наоборот, в фазе сжатия газ может диффундировать из пузырька в жидкость. Скорость диффузии зависит от коэффициента растворимости газа, с увеличением которого кавитационная эрозия падает. Чем сильнее насыщен моющий раствор газом, тем меньше эрозионная активность. Поэтому для процесса очистки не безразлично, какая газовая среда находится над поверхностью ультразвуковой ванны.

• *Температура моющего раствора* – от неё зависит давление насыщенных паров в растворе. В ряде случаев для обеспечения качественной очистки температуру необходимо поддерживать постоянной. При повышении температуры растут химическая активность и растворяющая способность моющего раствора, но уменьшаются вязкость, поверхностное натяжение, резко увеличивается давление парогазовой смеси, что приводит к уменьшению эрозионной способности.

На рис. 1 представлена принципиальная схема промывки труб и патрубков.

Для расчета моечно-очистных процессов необходимо знать функциональную зависимость скорости очистки от времени. Эта зависимость сложна и аналитические методы ее определения пока не найдены. Практически скорость очистки приходится определять экспериментально при определенных условиях процесса очистки.

На скорость очистки влияют следующие основные характеристики:

- 1) природа загрязнения (химический состав, прочностные свойства);
- 2) количество загрязнений (начальная загрязненность поверхности, количество загрязнений, допустимое на поверхности после очистки);
- 3) вид поверхности (материал, шероховатость, размеры и конфигурация поверхности);
- 4) очищающая среда (состав, концентрация, температура);
- 5) характер и параметры взаимодействия очищающей среды с поверхностью (скорость и размерные параметры потока, обусловленные конструкцией моечной машины).

Работа очистки A_0 складывается из работы $A_{фх}$ – совершаемой очищающей средой за счет своей физико-химической активности, и работы A_m – связанной с механическим воздействием среды на разрушение загрязнения и его связей с поверхностью:

$$A_0 = A_{фх} + A_m. \quad (6)$$

При ультразвуковой очистке важен правильный подбор моющего раствора, с тем чтобы он эффективно растворял или эмульгировал загрязняющие вещества, при этом, не влияя на саму очищаемую поверхность. Последнее обстоятельство особенно важно, поскольку ультразвук обычно значительно ускоряет физико-химические процессы в жидкостях, и агрессивное моющее вещество может быстро повредить поверхность.

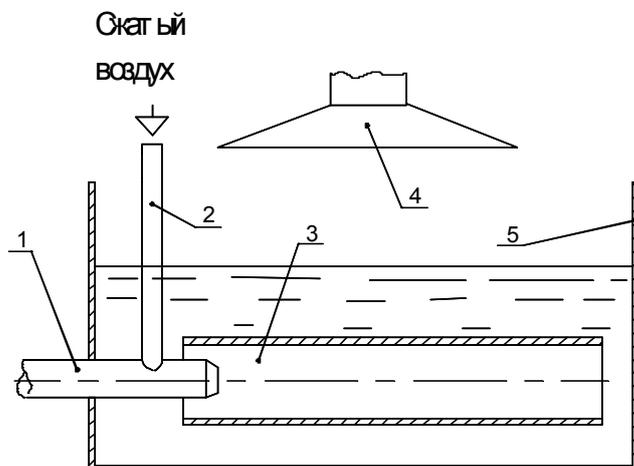


Рис. 1. Принципиальная схема промывки труб:

- 1 – коллектор подвода моющей жидкости; 2 – штуцер ввода газа;
3 – промываемая труба (патрубок); 4 – вытяжка; 5 – ванна

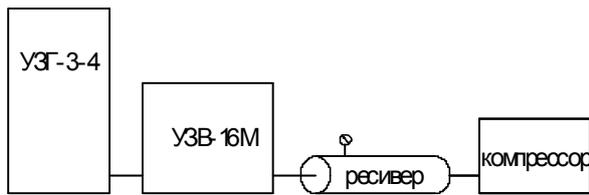


Рис. 2. Схема для экспериментов по ультразвуковой промывке труб

Комплект для ультразвуковой промывки должен состоять из двух ванн (одна для ультразвуковой очистки, другая промывочная), генераторов, преобразователей и других агрегатов.

Для реализации экспериментов по ультразвуковой промывке трубопроводов гидро- и топливной системы самолета была разработана схема лабораторного оборудования (рис. 2).

Ультразвук в ваннах очистки создается с помощью специальных устройств, основными элементами которых являются электрический генератор и преобразователь.

Генератор вырабатывает электрические колебания необходимой частоты, а преобразователь, получая электрический сигнал от генератора, излучает ультразвук.

В установке используются два магнитоstrictionных преобразователя, установленных в дно ванны. Действие преобразователя основано на эффекте, который состоит в деформации ферромагнетика при изменении намагничивания.

Предложен алгоритм проведения экспериментов для ультразвуковой промывки трубопроводов (рис. 3).

Технологический процесс состоит из шести операций: размочки (первичной очистки), ультразвуковой промывки, ополаскивания, сушки, контроля чистоты, укупорки.

Размочка (первичная очистка) осуществляется с целью размягчения загрязнений и удаления свободно перемещающихся примесей. Практика показывает, что не зависимо от вида загрязнений эта операция позволяет сократить продолжительность ультразвуковой промывки в 2...3 раза.

Ультразвуковая промывка. Трубы одинаковых марок материалов уложить в один ряд в сетчатую корзину таким образом, чтобы наиболее загрязненные места были повернуты в сторону где установлены преобразователи. Опустить корзину с деталями в ультразвуковую ванну на 3–5 минут.

Ополаскивание. Вынуть корзину с деталями из ультразвуковой ванны и промыть в горячей воде (50–80 °С) в течении 30–60 с методом многократного погружения.

Сушка. После промывки трубы просушить теплым воздухом ($t = 50 - 60^{\circ}C$) до удаления влаги.

Контроль чистоты промывки и контроль на

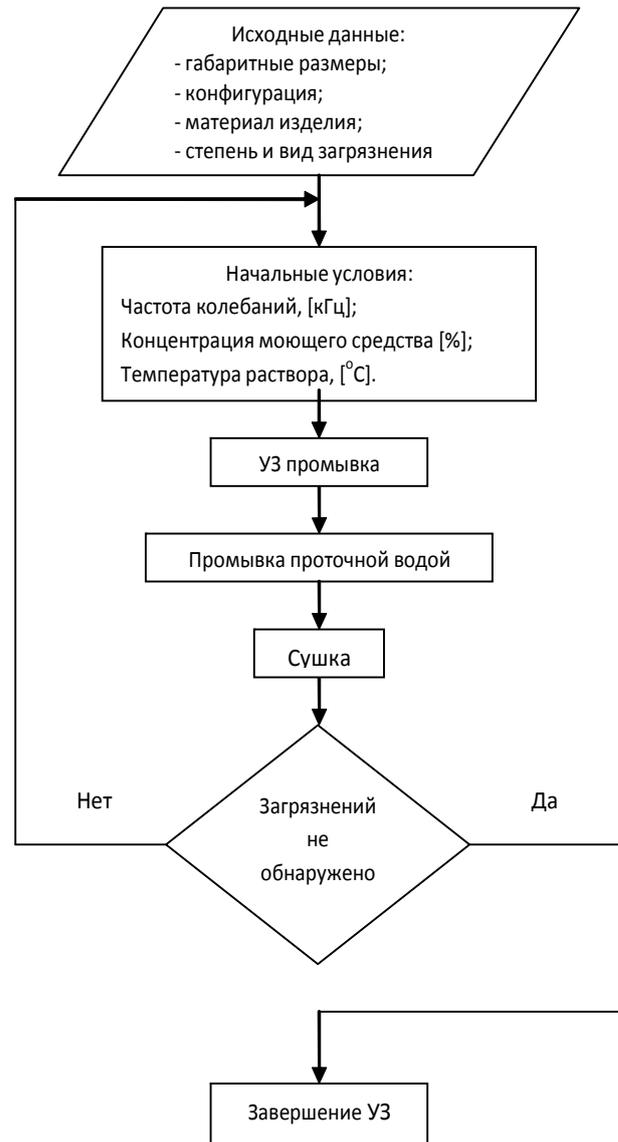


Рис. 3. Алгоритм для экспериментов по УЗ промывке труб

отсутствие влаги производить методом продувки через внутреннюю полость трубы на фильтровальную бумагу или салфетку. Контроль визуальный. Чистота наружной поверхности труб проверяется по чистоте салфетки “на отсутствие масляных пятен”. Возможен контроль наружной поверхности методом “разрыва водной пленки”. Деталь погрузить в воду (желательно дистиллированную), затем извлечь и после стекания избытка воды наблюдать за сплошностью водной пленки, после визуального контроля трубы просушить сухим сжатым воздухом.

Укупорка концов труб и патрубков является операцией, предназначенной для исключения возможности загрязнения их внутренних полостей после промывки, а так же для предохранения от механических повреждений сопрягаемых рабочих поверхностей деталей при транспортировке.

Для реализации экспериментов промывки в ультразвуковой ванне была разработана установка

Таблица 1. Виды моющих средств

Моющее средство	Температура воды, °C	Время промывки, мин
ОМ/УЗ	40	3
	50	3
	60	3
	30	2
	25	5
ОМ/СУ	40	3
	50	3
	60	3
	40	5
	25	3
Транс-Нефть	40	3
	50	3
	60	3
	60	5

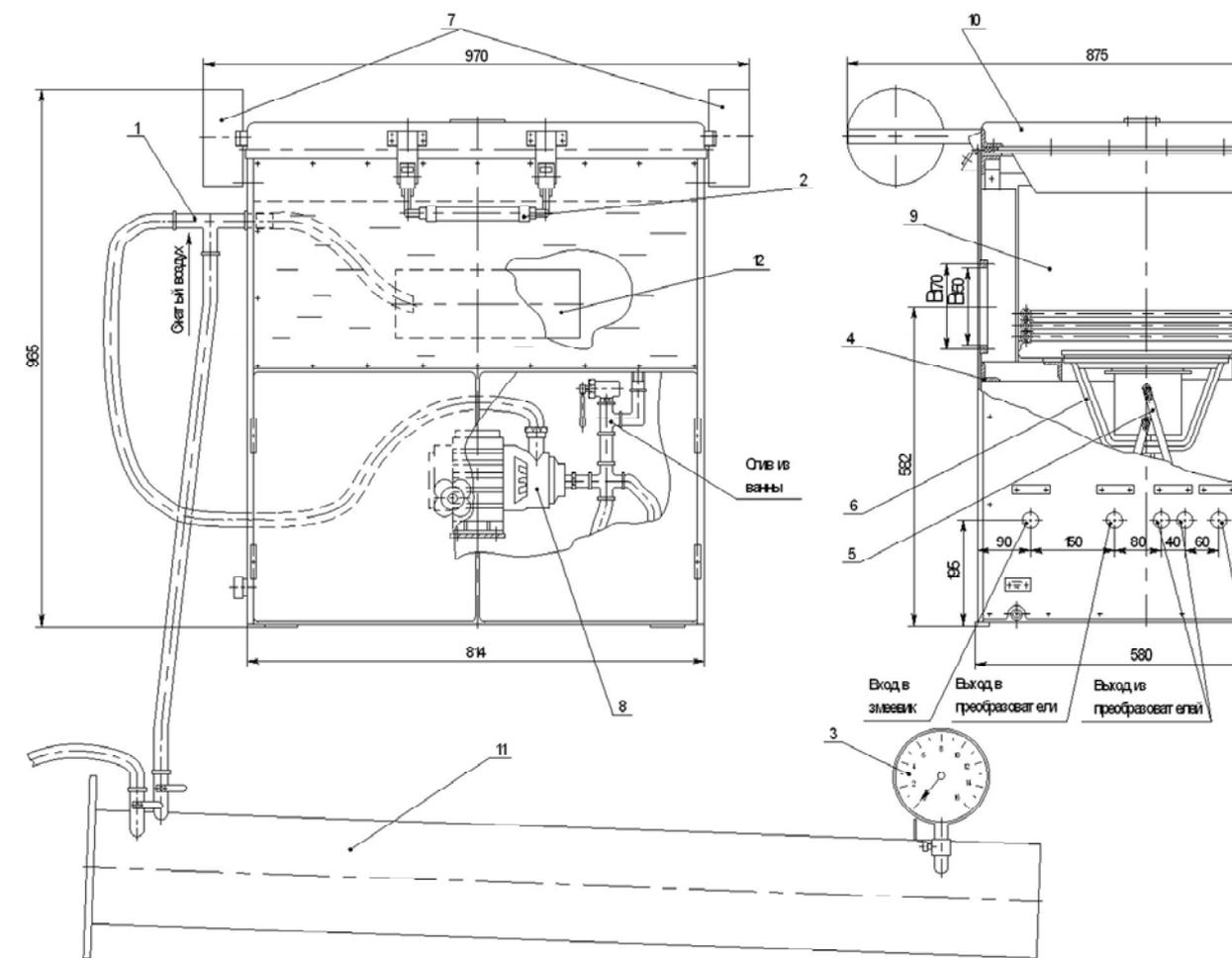


Рис. 4. Установка для ультразвуковой промывки трубопровода:

1 – форсунка; 2 – ручка; 3 – манометр; 4 – каркас для крепления бака; 5 – трубка охлаждения; 6 – каркас преобразователя; 7 – противовес; 8 – насос; 9 – бак; 10 – крышка; 11 – ресивер; 12 – испытуемый образец

(рис. 4). Источником питания ванны является ультразвуковой генератор УЗГ 3–4 с двумя магнетострикционными преобразователями ПМС–6–22.

В экспериментах применялись несколько видов очистителей, приведенные в табл.1.

В полученный раствор на несколько минут опускали грязные с жирными масляными пятнами образцы из таких материалов как: сталь 30ХГСА, титановый сплав ВТ–22, алюминиевых сплавов Д16Т. При проведении экспериментов

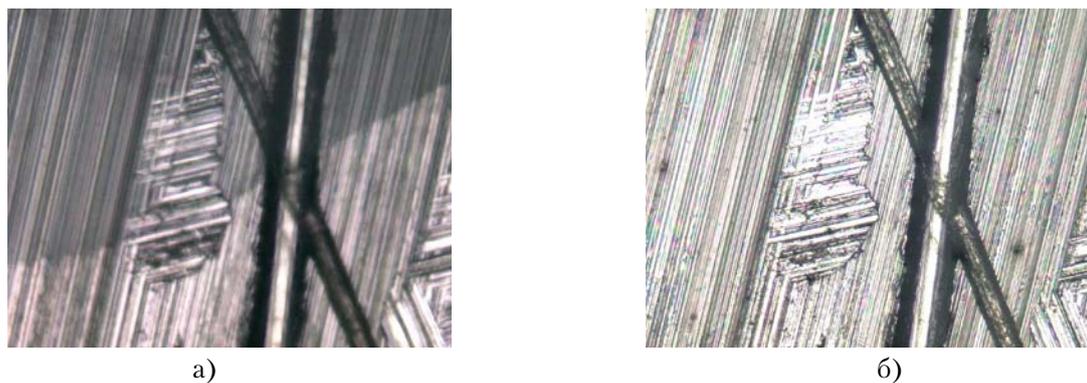


Рис. 5. Образец из стали 30ХГСА:
а – до ультразвуковой промывки; б – после ультразвуковой промывки

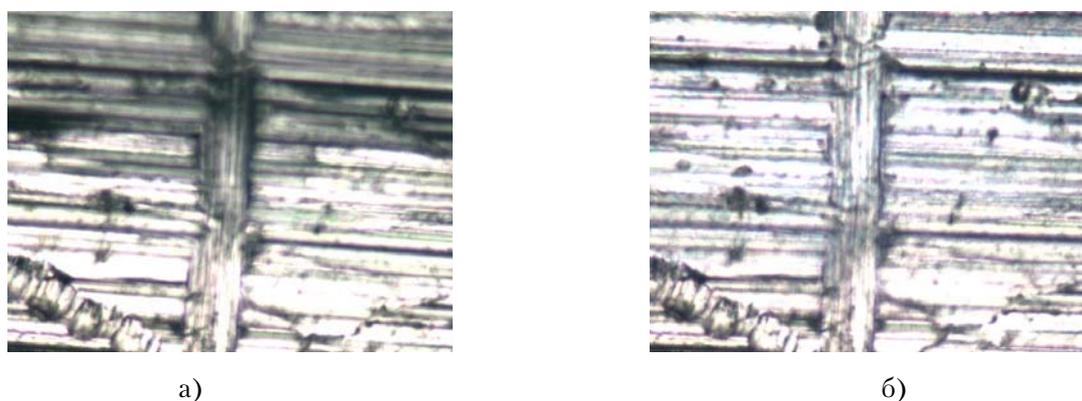


Рис. 6. Образец из титана VT22:
а – до ультразвуковой промывки; б – после ультразвуковой промывки

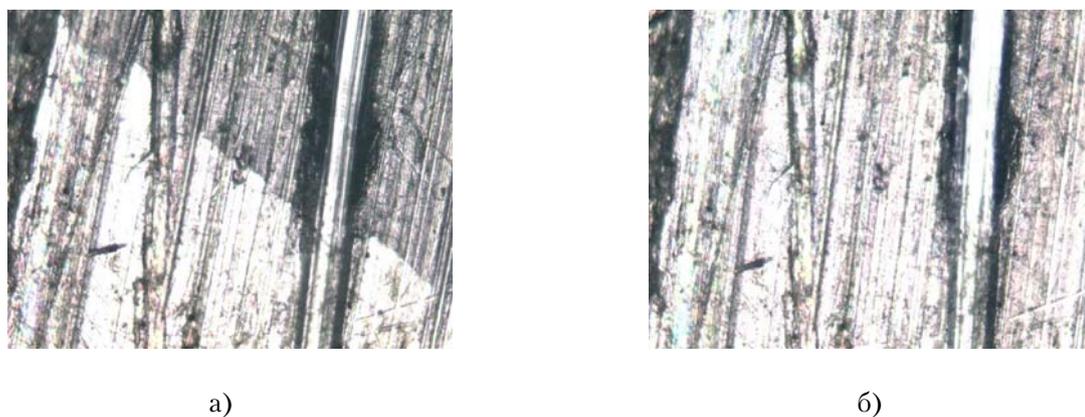


Рис. 7. Образец из дуралюмина Д16:
а – до ультразвуковой промывки; б – после ультразвуковой промывки

было уделено внимание температурным режимам и времени очистки образцов.

Контроль качества промывки образцов производился микроскопом “Raztek” (рис. 5-7).

ВЫВОД

Применение ультразвуковой очистки для промывки трубопроводов гидро- и топливных систем самолета позволяет заменить ручной труд,

ускорив тем самым процесс очистки, получить высокую степень чистоты поверхности, практически исключить использование пожароопасных и токсичных растворителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Келлер О.К., Кратыш Г.С., Лубяницкий Г.Д. Ультразвуковая очистка. Л.: Машиностроение (Ленинград. отд-ние), 1977. 184 с.
2. Физика и техника мощного ультразвука. Мощные ультразвуковые поля. М.: Наука”, 1968. 266 с.

**THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR CLEANING
PIPELINES HYDRAULIC AND FUEL SYSTEMS OF AIRCRAFT USING ULTRASOUND**

© 2013 A.A. Fedorov, N.V. Kabanov

Ulyanovsk State Technical University

The possibility of ultrasonic cleaning of pipelines. The efficiency of this type of treatment. A design of an ultrasonic apparatus for carrying out the cleaning process gtdro and aircraft fuel systems.

Keywords: ultrasonic, disassembling, clearing, technology, cavitation.

*Alexander Fedorov, Candidate of Technics, Associate Professor
at the Aircraft Manufacturing Department.*

E-mail: avia@ulstu.ru

*Nikolay Kabanov, Student at the Aircraft Manufacturing
Department*