

УДК 621.9.048.6

Н. К. ТОЛОЧКО, д-р физ.-мат. наук, В. С. КОРКО, канд. техн. наук, А. Н. ЧЕЛЕДИНОВ (БГАТУ, г. Минск),
В. Л. ЛАНИН, д-р техн. наук (БГУИР, г. Минск), e-mail: n.tolochko@hotmail.com

Факторы неравномерной очистки деталей машин в ультразвуковых ваннах

Определены факторы неравномерного удаления загрязнений с поверхностей деталей машин при их очистке в ультразвуковой ванне, связанные с неоднородным распределением активности кавитации в ее объеме.

Ключевые слова: детали, ультразвуковая ванна, активность кавитации, очистка поверхности, загрязнения.

The factors of non-uniform removal of impurities from surfaces of machine parts at their cleaning in ultrasonic bath, related with irregular distribution of cavitation activity in its volume, are determined.

Keywords: parts, ultrasonic bath, cavitation activity, surface cleaning, impurities.

При изготовлении, ремонте и техническом обслуживании машин их детали очищают от загрязнений. В последние годы большое распространение получила ультразвуковая (УЗ) очистка, которую проводят в УЗ моечных ваннах, основанная на акустической кавитации. Эффективность УЗ очистки тем больше, чем выше активность a_k кавитации. На практике важны условия очистки, при которых обеспечивается равномерное удаление загрязнений с поверхностей деталей. Для этого необходимо, чтобы распределение активности a_k было однородным по всему объему моеющей жидкости, в котором осуществляется очистка. Однако эксперименты [1] показали неоднородное распределение a_k по объему жидкости в рабочей полости УЗ ванны, а следовательно, неравномерное очищение поверхностей деталей. Закономерности влияния неоднородности распределения a_k по объему жидкости на равномерность очистки в УЗ ванне до сих пор мало изучены.

В данной статье экспериментально исследованы особенности неравномерной очистки поверхностей деталей в УЗ ванне при неоднородном распределении a_k в объеме воды, заполняющей ванну. Использовали УЗ моечную установку УЗУ-0,25, генератор которой имел напряжение питания 220 В, потребляемую и выходную мощности соответственно 450 и 250 Вт, рабочую частоту 18 кГц. Ванна длиной 22 см, шириной 17 см и глубиной 16 см имела объем 4,5 л и была снабжена тремя пьезоэлектрическими преобразователями, встроенными в центральную часть дна. Ванну заполняли водой до фиксированного уровня H_0 .

Активность кавитации оценивали с помощью кавитометра ИСА-4D-М (разработан и создан в

БГУИР, г. Минск). Прибор измерял активность захлопывающихся и пульсирующих кавитационных пузырьков с высокой степенью локализации. Величину a_k определяли в относительных единицах по индикаторной шкале электронного блока кавитометра.

При измерениях щуп вертикально погружали в воду, заполняющую ванну, так, чтобы его концевая часть (гидрофон) располагалась над излучателями на разном расстоянии H от них (от дна ванны). Минимальное расстояние между щупом и излучателем составляло $2 \div 3$ мм.

Исследования проводили в незагруженной и загруженной ваннах. В качестве исследуемых объектов использовали специально изготовленные модельные образцы различных размеров и форм, часть которых были тестовыми образцами, подвергаемыми очистке. На их поверхности предварительно наносили модельные загрязнения разного состава. Загружали как одиночные объекты, так и группы объектов. Требуемое положение объектов в воде обеспечивали механические держатели.

На рис. 1 приведена типичная зависимость $a_k(H)$, полученная для незагруженной ванны ($H_0 = 12$ см), имеющая вид нисходящей синусоидальной затухающей кривой (сплошная линия). Форма кривой определяется высокой локальностью измерений кавитометра, который воспринимает изменения a_k , как чередование областей разрежения и сжатия в направлении распространения УЗ волн с шагом, равным половине длины волны: $\lambda/2 \approx 4$ см (длина волны в воде $\lambda = v/f \approx 8$ см, скорость звука в воде $v = 1480$ м/с, частота колебаний $f = 18$ кГц). Чтобы точно оценить общее уменьшение a_k по высоте столба воды в ванне — от излучателей (дна ванны)

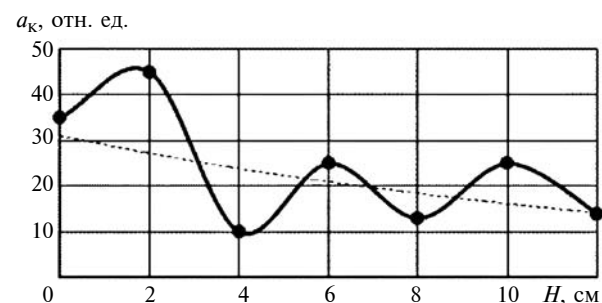


Рис. 1. Зависимость активности a_k кавитации от расстояния H детали от излучателей в незагруженной ванне

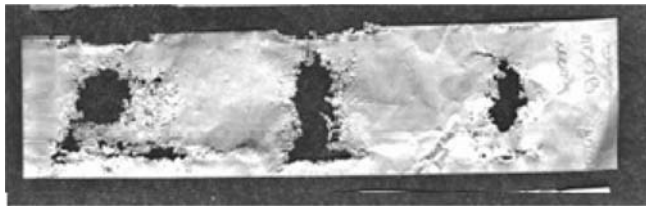


Рис. 2. Эрозионное разрушение фольги в результате УЗ обработки (длина полоски фольги 13 см)

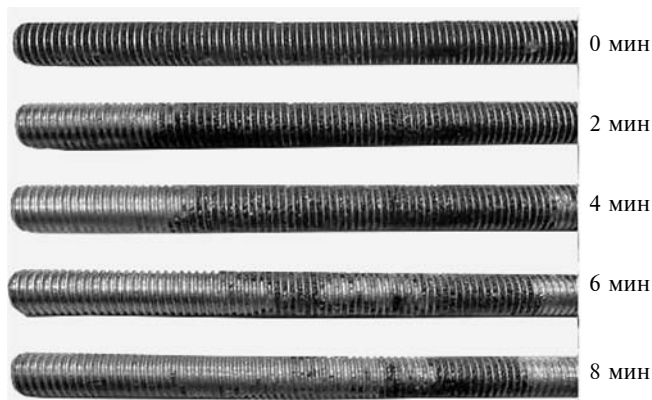


Рис. 3. Стержень с резьбой после УЗ очистки через разные промежутки времени

до поверхности воды, предпочтительнее вместо полученной кривой рассмотреть соответствующую ей срединную кривую (см. рис. 1, штриховая линия).

Периодическое изменение a_k по высоте столба воды в ванне проявляется в неравномерном эрозионном воздействии кавитации на полоску алюминиевой фольги, которую вертикально установили над одним из излучателей: следы эрозии в виде сквозных пробоин возникают в местах, соответствующих областям сжатия в стоячей УЗ волне (рис. 2).

Подобные периодические изменения a_k проявляются в неравномерной очистке поверхностей деталей. Например, на длинный стальной стержень (рис. 3) диаметром 8 мм и длиной 115 мм с резьбовой поверхностью предварительно нанесли равномерным по толщине слоем модельное загрязнение в виде смеси глины и моторного масла 10W-40 в соотношении 3:1. Стержень вертикально установили в ванне над одним из излучателей, левая часть стержня в процессе очистки была обращена вниз, т. е. к излучателю. Загрязнение удалялось преимущественно в местах поверхности, соответствующих распределению областей сжатия в УЗ волне.

Анализ экспериментальных исследований формирования УЗ поля в объеме воды в незагруженной ванне показал довольно неравно-

мерное распределение a_k по высоте столба воды. Наибольшие значения a_k наблюдаются вблизи излучателей и уменьшаются при удалении от них: они меньше в $\sim 1,2$ раза у стенок ванны и в 2 раза и более — у поверхности воды. Такое уменьшение a_k обусловлено затуханием УЗ волн вследствие их поглощения водой. Оно влияет на очистку поверхности стержня, которая начинается с нижней части, расположенной ближе к излучателю, и распространяется вверх по всей длине стержня.

Чтобы оценить влияние объемно-неоднородного распределения a_k на удаление загрязнений, выполнили экспериментальную очистку тестовых образцов в виде стальных цилиндров диаметром 20 мм и длиной 43 мм (рис. 4). На цилиндрической поверхности образцов выточили кольцевые канавки шириной 1,3 мм и глубиной 4 мм, которые также заполняли смесью глины и моторного масла 10W-40 в соотношении 3:1. Образцы, ориентированные продольной осью в горизонтальном направлении, разместили в ванне, заполненной водой на высоту $H_0 = 14$ см, над одним из излучателей на разном расстоянии от него. Во время УЗ обработки образцы периодически извлекали из воды и фотографировали. Высоту h слоя загрязнения в канавках измеряли на увеличенных фотографиях образцов. Эксперименты показали, что высота h уменьшается тем быстрее, чем меньше высота H (рис. 5). Так, на поверхности цилиндра, обращенной к излучателю, слой загрязнения полностью удаляется через 7,5 мин обработки при $H = 2$ см и через 15 мин при $H = 5$ см.

Эксперименты также показали, что скорость удаления загрязнений зависит не только от расстояния очищаемой поверхности от излучателя, но и от ее ориентации относительно излучателя. Высота h загрязнения уменьшается гораздо быстрее на поверхности образца со стороны излучателя. Так, со стороны излучателя загрязнение удаляется полностью через 7,5 мин обработки, а с противоположной стороны удаляется приблизительно $0,5h$ загрязнения через 20 мин (при $H = 2$ см). Неравномерная очистка участков поверхности объекта, разно ориентированных относительно излучателя, обусловлена неоднородным распределением a_k вокруг объекта, который препятствует распространению УЗ волн, вызывая их рассеяние.

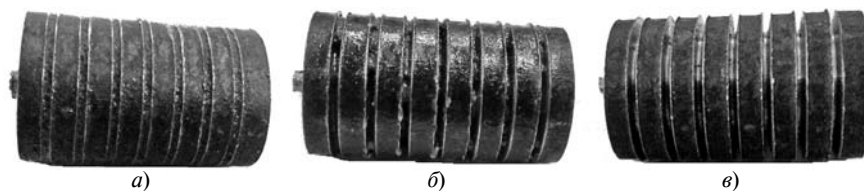


Рис. 4. Поверхности цилиндрических тестовых образцов с канавками, полностью загрязненными (а), частично очищенными (б) и полностью очищенными (в)

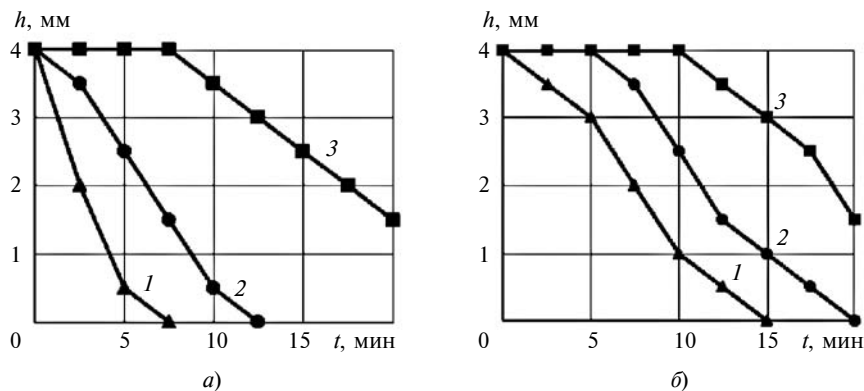


Рис. 5. Изменение высоты h слоя загрязнения в канавках цилиндрических тестовых образцов во времени t при $H = 2$ (а) и 5 см (б):

1, 2 и 3 — участки цилиндрической поверхности образцов соответственно нижний (обращен в сторону излучателя), боковой и верхний

Для исследования характера распределения a_k вокруг одиночного объекта использовали пластмассовые диски толщиной 3 мм и разных диаметров D . Диски размещали горизонтально в воде, заполняющей ванну на $H_0 = 13$ см, между излучателями на расстоянии 7,5 см от дна ванны. Щуп располагали над дисками со стороны водной поверхности на расстоянии 2÷3 мм от дисков. Зависимость $a_k(D)$ приведена на рис. 6 ($D = 0$ соответствует отсутствию диска). Экспериментами установлено, что за дисками образуется область акустической тени с меньшими значениями a_k , которые тем меньше, чем больше диаметр. Так, при $D = 10$ см значение a_k будет в 2,5 раза меньше, чем при $D = 0$. Образование акустической тени за препятствием связано с дифракцией УЗ волн. При наличии на пути распространения УЗ волн не одного, а группы объектов, они рассеиваются многократно.

Для исследования особенностей распределения a_k в объеме воды в ванне в условиях многократного рассеяния УЗ волн использовали диски из плотной резины диаметром 6 см и толщиной 2 см. Диски, ориентированные горизонтально, размещали в ванне в три слоя. Верхний и нижний слои содержали по три диска, уложенных в один ряд по длине ванны, средний слой содержал шесть дисков, уложенных в два ряда. В каждом слое диски располагали преимущественно в центре ванны над излучателями. Диски в слоях частично перекрывали друг друга. Расстояние между слоями, а также между нижним слоем и дном ванны составляло 2 см. Для измерений a_k щуп кавитометра погружали в воду в зазорах между дисками, располагая его вертикально, как в рассмотренных выше экспериментах с незагруженной ванной (см. рис. 1).

Типичная зависимость $a_k(H)$ для загруженной ванны ($H_0 = 14$ см) представлена на рис. 7. Сравнивая ее с аналогичной зависимостью, получен-

ной для незагруженной ванны (см. рис. 1), отметим следующее.

Во-первых, зависимость $a_k(H)$ для загруженной ванны располагается значительно ниже, чем для незагруженной ванны, т. е. значения a_k при загрузке ванны существенно снижаются.

Во-вторых, зависимость $a_k(H)$ для загруженной ванны менее крутая, чем для незагруженной ванны. Казалось бы, что разность значений a_k вблизи излучателей ($a_{k,из}$) и у поверхности воды ($a_{k,вп}$) должна уменьшиться. Однако наблюдается обратное: при загрузке ванны разность указанных значений увеличивается, что

объясняется их общим снижением. Действительно, о влиянии загрузки ванны на уменьшение a_k по высоте столба воды можно судить по величине отношения $\gamma_3/\gamma_{нз}$, где $\gamma_3 = (a_{k,из}/a_{k,вп})_3$ — для загруженной ванны и $\gamma_{нз} = (a_{k,из}/a_{k,вп})_{нз}$ — для незагруженной ванны. По усредненным измерениям кавитометра получили: $\gamma_3 = 2,9$ и $\gamma_{нз} = 2,2$. Тогда отношение составило $\gamma_3/\gamma_{нз} \approx 1,3$. Следовательно, для загруженной ванны значение a_k уменьшилось в 1,3 раза больше, чем для незагруженной.

Для исследования влияния неоднородности распределения a_k по высоте столба воды в ванне на равномерность очистки использовали резиновые диски, на плоские поверхности которых (нижнюю и верхнюю) наносили смесь глины и нигрола в со-

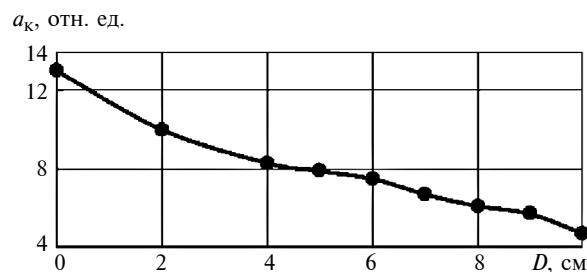


Рис. 6. Зависимость активности кавитации a_k от диаметра D дисков

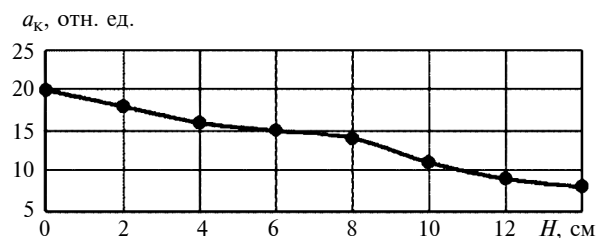


Рис. 7. Зависимость активности a_k кавитации от расстояния H дисков от излучателей

отношении 3:1. Загрязнения толщиной 1 мм нанесли в виде кружков диаметром 15 мм с использованием специального трафарета. Длительность УЗ очистки составляла 5 мин. Визуальный осмотр показал, что загрязнения удаляются крайне неравномерно: быстрее очищается нижняя поверхность со стороны излучателей, причем дисков, расположенных ближе к ним. Приблизительная процентная оценка степени удаления загрязнений с поверхности дисков приведена в таблице (100 % — полное удаление загрязнения, 0 — загрязнение практически не удалено, т. е. поверхность осталась в исходном состоянии).

Активность кавитации изменяется пропорционально интенсивности УЗ волн [2], которая уменьшается по экспоненциальному закону с увеличением расстояния H от излучателя в результате поглощения УЗ волн водой [3]. Соответственно, с увеличением H по такому же закону уменьшается и активность кавитации.

Таким образом, зависимость $a_k(H)$, представленная нисходящей срединной кривой для незагруженной ванны (см. рис. 1), имеет вид:

$$a_k = a_{k0}e^{-kH}, \quad (1)$$

где a_{k0} — активность кавитации у поверхности излучателя; k — коэффициент снижения активности кавитации в результате поглощения УЗ волн водой: чем больше k , тем круче снижается зависимость a_k . При уменьшении a_k в e раз в формуле (1) показатель степени $kH = 1$, откуда следует, что $k = 1/H$. Итак, коэффициент k поглощения обратно пропорционален расстоянию распространения УЗ волн, на котором кавитация убывает в e раз.

Зависимость $a_k(H)$, представленную нисходящей затухающей синусоидальной кривой для незагруженной ванны (см. рис. 1), можно описать эмпирическим уравнением

$$a_k = [a_{k0} + n\sin(mH)]e^{-kH}, \quad (2)$$

где n и m — амплитуда и частота синусоидальной кривой

Чем меньше n , тем меньше амплитуда, чем меньше m , тем меньше частота. При $n \rightarrow 0$ и/или $m \rightarrow 0$ нисходящая затухающая синусоидальная кривая вырождается в нисходящую срединную кривую.

Зависимость $a_k(H)$, представленная нисходящей кривой для загруженной ванны (см. рис. 7), описывается выражением

$$a_k = Qa_{k0}e^{-qkH}, \quad (3)$$

где Q и q — безразмерные коэффициенты, определяемые экспериментально.

Коэффициент Q определяет снижение положения кривой $a_k(H)$, коэффициент q — уменьшение

| Слой расположения дисков | Удаление загрязнений с поверхности дисков, % | |
|--------------------------|--|--------|
| | верхней | нижней |
| Верхний | 0 | 20÷30 |
| Средний | 10÷20 | 100 |
| Нижний | 50÷60 | 100 |

крутизны кривой $a_k(H)$ в результате загрузки ванны объектами.

Сравнение уравнений (1) и (3) показало, что формально они подобны друг другу.

Уравнение (1) описывает срединную кривую зависимости $a_k(H)$ на рис. 1 при $a_{k0} = 31,067$ и $k = 0,065$ и имеет вид

$$a_k = 31,067e^{-0,065H}.$$

Уравнение (3) описывает кривую зависимости $a_k(H)$ на рис. 7 при $Qa_{k0} = 21,04$ и $qk = 0,066$ и имеет вид

$$a_k = 21,04e^{-0,066H}.$$

Таким образом, как показали исследования в УЗ ванне с водой и излучателями на дне, активность a_k кавитации распределяется весьма неоднородно, что обусловлено затуханием УЗ волн в результате их поглощения водой, наличием чередующихся областей разрежения и сжатия по направлению распространения волн, рассеянием волн на очищаемых деталях. Это приводит к значительной неравномерности удаления загрязнений с поверхности разных деталей, погруженных в ванну, а также с разных участков поверхности одной и той же детали. Установленные соответствия между объемно-неоднородным распределением активности a_k кавитации и неравномерностью очистки следует учитывать на практике при выборе оптимальных условий очистки деталей в УЗ ваннах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Томаль В., Ланин В.** Ультразвуковая очистка микрорельефных поверхностей оптоэлектронных изделий // Фотоника. 2007. № 4. С. 35—40.
2. **Голых Р. Н.** Повышение эффективности ультразвукового кавитационного воздействия на химико-технологические процессы в гетерогенных системах с несущей высоковязкой или неньютоновской жидкой фазой: Дис. ... канд. техн. наук. Барнаул: Алтайский ГТУ им. И. И. Ползунова. 2014. 193 с.
3. **Ультразвук.** Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И. П. Голямина. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.