

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ЭЛАСТИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

IMPROVED PROCESS ULTRASONIC CAVITATION TREATMENT ELASTIC SURFACE

Екатерина Луговская, Олег Яхно

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт» г. Киев, Украина*

Abstract

Results of experimental studies of ultrasonic cavitation cleaning technology of flexible surfaces. An analysis of the ways to enhance technology. The design of ultrasonic resonance drive-emitter with a developed surface radiation, providing increased efficiency of the technological process.

Keywords: ultrasonic cavitation, ultrasonic cavitation cleaning technology.

ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы, использующие явление ультразвуковой кавитации и, сопутствующие ей, эффекты второго порядка, широко используются в промышленности и быту [1-3]. Ультразвуковые кавитационные технологии получили интенсивное развитие в последние годы в связи с резким повышением требований к экологической безопасности действующих и вновь создаваемых производств.

Одной из наиболее широко распространенных технологий с повышенной экологической опасностью является технология очистки эластичных поверхностей, например, тканевых [4]. Традиционная реализация указанной технологии предполагает удаление твердых и жировых загрязнений с тканевых поверхностей за счет интенсивного относительного перемещения моющего раствора и загрязненной поверхности. При этом технологический моющий раствор предварительно насыщается химически активными веществами, максимальная поверхностная активность которых достигается при повышенной до 90...95⁰С температуре. За счет механического или воздушного пузырькового перемешивания

обеспечивается растворение и смывание загрязнений, а также подвод свежих порций поверхностно активных компонентов моющего раствора к загрязненным участкам ткани. Если обрабатывается тонкая ажурная ткань, то интенсивное механическое перемешивание значительно повышает вероятность повреждения ткани.

При обработке эластичных поверхностей санитарно-гигиенических изделий, например, медицинского назначения велика вероятность попадания в отработанный моющий раствор опасных для здоровья человека и окружающей среды микроорганизмов. В этом случае санитарно-эпидемиологическая безопасность требует обязательной дополнительной дезинфекции очищенных тканевых изделий и отработанного моющего раствора. Стерилизацию изделий медицинского назначения традиционно выполняют горячим паром или ультрафиолетовыми лампами [5]. Применение ультрафиолетовых ламп для обеззараживания отработанного моющего раствора оказывается малоэффективным из-за его повышенной мутности.

Отработанный моющий раствор, насыщенный агрессивными химическими веществами и опасными микроорганизмами,

по традиционной технологии сливается в канализацию.

Целью предлагаемой статьи является рассмотрение возможностей замены традиционной технологии очистки эластичных поверхностей на ультразвуковую кавитационную технологию и исследование путей достижения высокой эффективности новой технологии.

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ

Качество технологий очистки эластичных поверхностей и эффективность создаваемого для их реализации оборудования принято оценивать по степени удаления с хлопчатобумажной тканевой поверхности стандартного набора загрязнений: сажа с минеральным маслом, кровь, какао с молоком и красное вино.

Однако, не менее важной характеристикой любой технологии очистки является степень ее влияния на прочностные характеристики очищаемой поверхности. Традиционная технология с механическим перемешиванием и интенсивным химическим высокотемпературным воздействием на эластичную поверхность приводит к интенсивному разрушению тканевых волокон и снижению прочности ткани на разрыв.

Использование в технологии очистки эффекта ультразвуковой кавитации, при котором, вводимая в жидкость, ультразвуковая волна высокой интенсивности в фазе разрежения нарушает сплошность жидкости, порождая образование из зародышей кавитации паро-газовых пузырьков, их рост и захлопывание в фазе сжатия, позволяет отказаться от механического перемешивания ткани, а загрязнения с поверхности ткани удалять за счет кавитационной эрозии и микротечений. Зародыши кавитации, представляющие собой микроскопические пузырьки, удерживаются в микротрещинах и микронеровностях твердых поверхностей, на частичках мусора и газовых пузырьках, насыщающих жидкость. Волокнистая пористая структура большинства тканей при погружении в воду также способствует удержанию в ее объеме большого количества зародышей кавитации. Твердые загрязнения при кавитационной

технологии разрушаются за счет сферических ударных волн, возникающих при захлопывании множества кавитационных пузырьков, удаленных от очищаемой поверхности или друг от друга, а также за счет кумулятивных струй, возникающих при несимметричном захлопывании пузырьков, находящихся в непосредственной близости от очищаемой поверхности. Из-за радиальной неуравновешенности сил на поверхности кавитационного пузырька кумулятивная струя направлена в сторону близлежащей поверхности. Ее точечные высокоэнергетические удары по затвердевшему загрязнению приводят к интенсивному разрушению последнего. В зависимости от соотношения сил адгезии и когезии возможно постепенное разрушение загрязнения или его отрыв от эластичной поверхности, в частности, тканевых волокон.

Ультразвуковая кавитационная технология очистки дополнительно обладает и стерилизующим эффектом.

Эффект обеззараживания в ультразвуковом поле реализуется в соответствии со следующими механизмами [6,7]:

- разрушительное действие кумулятивной струи, образующейся при захлопывании кавитационного пузырька, находящегося в непосредственной близости от микроорганизма;
- ударное воздействие на микроорганизмы сферических волн давления, образующихся при захлопывании кавитационного пузырька, удаленного от очищаемой поверхности, поверхности микроорганизма и соседних пузырьков;
- уничтожение микроорганизмов за счет перепада давлений по длине ультразвуковой волны;
- термическое воздействие на микроорганизмы за счет локального повышения температуры при захлопывании кавитационных пузырьков до 1000°C;
- активизация окислительных процессов в кавитационной области.

Микроорганизмы автоматически уничтожаются в процессе ультразвуковой кавитационной очистки независимо от мутности отработанного моющего раствора. В результате отработанный моющий раствор становится безопасным с точки зрения

санитарно-эпидемиологических норм и подлежит традиционной утилизации. Очищенные кавитационной технологией ткани также являются обеззараженными и не требуют дополнительной дезинфицирующей обработки.

Для успешного внедрения технологии ультразвуковой кавитационной очистки эластичных поверхностей необходимо, прежде всего, оценить степень ее влияния на прочностные характеристики самих очищаемых поверхностей, поскольку в основе технологии кавитационного удаления загрязнений в основном лежит механизм силового взаимодействия ударных волн и кумулятивных струй с очищаемой поверхностью. Поэтому логично предположить, что одновременно с загрязнением будет разрушаться и волокнистая нитевая структура очищаемой ткани.

Были проведены специальные сравнительные исследования изменения прочности различных тканей при традиционной барабанной технологии очистки и при ультразвуковой кавитационной технологии очистки. Исследования проводились на четырех широко распространенных видах тканей: ситец, батист, бязь и шелк. Жесткость технологической воды составляла 0,5...3 ммоль/л. Для получения моющего раствора использовался универсальный синтетический стиральный порошок, в котором содержалось 20% поверхностно-активных веществ. Показатель pH 1%-го раствора этого порошка в дисцилированной воде составлял 9...9,5. Концентрация порошка во всех испытаниях поддерживалась одинаковой. Температура моющего раствора поддерживалась на уровне 40°C. Продолжительность

каждого цикла очистки составляла 30 мин.

Влияние количества циклов очистки на изменение прочности тканей проводилось на образцах размером 30 x 100 мм. Одну часть образцов подвергали обработке по традиционной технологии в стиральной машине барабанного типа, а другую - обработке по ультразвуковой кавитационной технологии.

Источником ультразвуковых колебаний являлся резонансный малоамплитудный пьезоэлектрический привод-излучатель в виде полуволнового преобразователя Ланжевена, который был размещен на донной поверхности ванны. Потребляемая кавитационной ванной мощность составляла 100 Вт. Ультразвуковые колебания излучались с частотой 38 кГц. Интенсивность вводимых в жидкость ультразвуковых колебаний составляла 2,5 Вт/см², плотность ультразвуковой энергии в объеме жидкости составляла 0,1 Вт/см³, амплитуда колебаний излучающей поверхности привода – 5 мкм. После каждого цикла очистки по двум технологиям образцы проходили полную сушку. Затем часть образцов подвергалась испытаниям на прочность с помощью универсальной разрывной машины TIRAtest-2151.

Испытания на разрыв проводились со скоростью перемещения активного захвата 50 мм/мин при температуре 22°C и относительной влажности 86%.

Полученные результаты (рис.1) свидетельствуют о том, что после 30 технологических циклов как барабанной, так и ультразвуковой кавитационной очистки прочность почти всех рассматриваемых видов тканей уменьшилась на 16...23% от исходных значений.

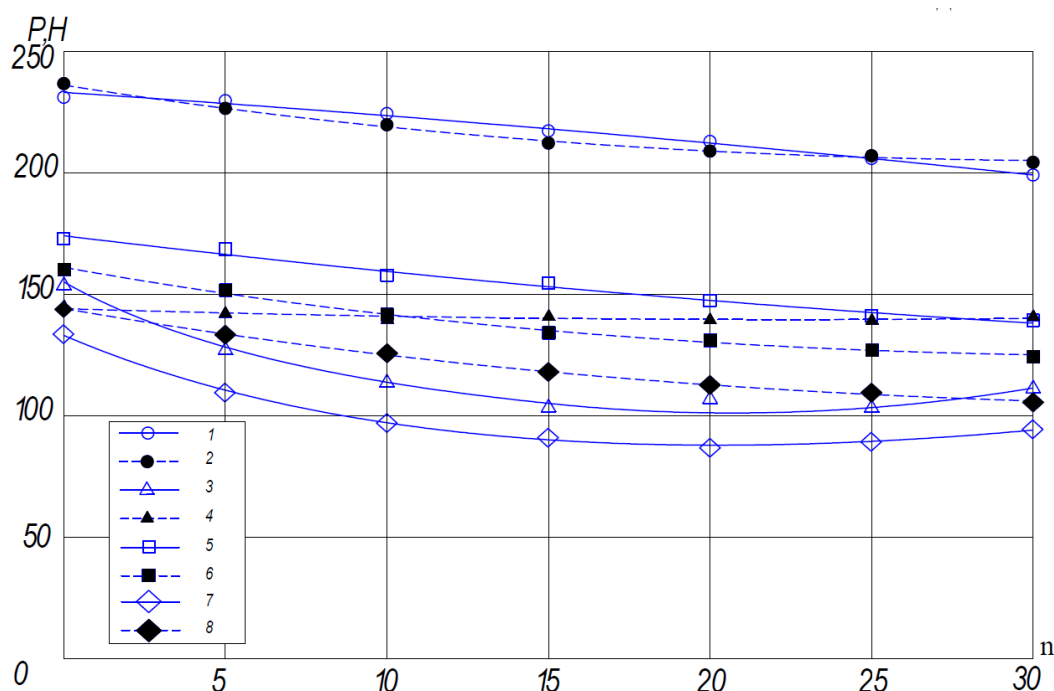


Рис. 1. Зависимость усилия разрыва образцов ткани от количества циклов обработки (обработка ткани традиционной технологией очистки в машине барабанного типа: 1 – бязь; 3 – батист; 5 – шелк; 7 – ситец; обработка ткани ультразвуковой кавитационной технологией: 2 – бязь; 4 – батист; 6 – шелк; 8 – ситец)

При этом сравнение барабанной и кавитационной стирки показывает, что оба рассматриваемых технологических процесса одинаково снижают прочность ткани. Исключение составляет батист, показывающий высокую устойчивость к кавитационному воздействию. Его прочность после 30 циклов кавитационной очистки уменьшилась только на 2-3%, в то время как после 30 циклов барабанной очистки прочность батиста уменьшилась на 22%. Наблюдается своеобразное кавитационное упрочнение нитей батиста за счет уплотнения структуры.

Для оценки качества очистки была выбрана ткань ситец. Исследовались три способа очистки: традиционный барабанный с механическим перемешиванием и два кавитационных, использующих разные режимы ультразвуковой кавитации, – режим с ультразвуковой волной интенсивностью до 10 Вт/см², создаваемой малоамплитудным резонансным приводом-излучателем, и режим с ультразвуковой волной интенсивностью более 10 Вт/см², создаваемой высокоамплитудным резонансным приводом-излучателем.

Исследования показали, что наиболее высокое качество очистки затвердевших загрязнений достигается при кавитационной очистке с ультразвуком малой интенсивно-

сти, а жировых – при кавитационной очистке с ультразвуком большой интенсивности.

Ультразвуковая кавитация возникает при достаточно широком спектре частот, вводимых в жидкость колебаний [7].

Размеры и особенности поведения кавитационных пузырьков, образующихся в жидкости при введении ультразвуковой волны высокой интенсивности, зависят от многих факторов, основными из которых являются: частота колебаний, гидростатическое давление, амплитуда звукового давления, реологические свойства жидкости и характеристики насыщенного пара.

Эффективность кавитационной технологии очистки в немалой степени зависит от количества, находящихся в жидкости зародышей кавитации, способных инициировать кавитацию. Инициировать ультразвуковую кавитацию могут только зародыши определенного интервала размеров.

В этом интервале минимальный размер $R_{0\min}$ зародыша, способного кавитировать при заданных условиях, определяется зависимостью [8]

$$p_a - p_0 \succ \frac{2}{3} \sqrt{\frac{8\sigma^3}{3R_{0\min}(p_0 + 2\sigma/R_{0\min})}}, \quad (1)$$

где: p_a - звуковое давление, создаваемое звуковым полем; p_0 - гидростатическое давление; σ - коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Выражение (1) показывает, что минимальный допустимый размер зародыша определяется величинами гидростатического и звукового давлений. Представленное выражение справедливо при условии, что давление насыщенных паров пренебрежимо мало по сравнению с амплитудой звукового давления.

Максимальный размер $R_{0\max}$ зародыша в рассматриваемом интервале соответствует размерам пузырька, собственная частота которого равна частоте ультразвуковой волны. Максимальный размер зародыша и частота колебаний связаны зависимостью [9]

$$(2\pi f)^2 = \frac{3\gamma_a}{\rho_p R_{0\max}^2} \left(p_a + \frac{2\sigma}{R_{0\max}} \right), \quad (2)$$

где f - частота звуковых колебаний; ρ_p - плотность невозмущенной жидкости; γ_a - показатель адиабаты.

С ростом частоты колебаний согласно выражению (2) при неизменных прочих условиях уменьшается величина $R_{0\max}$, что свидетельствует о снижении вероятности возникновения кавитации на больших частотах. Поэтому кавитационная технология очистки наиболее эффективна в низкочастотной области ультразвуковых колебаний.

При интенсивности ультразвуковых колебаний в пределах $1 \dots 10 \text{ Вт/см}^2$, что соответствует малым амплитудным значениям звукового давления, в моющем растворе в фазе разряжения активно образуются мелкие, практически не наблюдаемые невооруженным глазом, кавитационные паро-газовые пузырьки.

Совершив одно или несколько переколебаний и накопив энергию, пузырьки в фазе сжатия захлопываются. Колебания пузырьков и расходящиеся ударные волны порождают микротечения в моющем растворе. Микротечения способствуют перемешиванию моющего раствора на молекулярном

уровне. Большое количество захлопывающихся пузырьков обеспечивает образующейся кавитационной среде высокую эрозионную активность, активизирует жидкость за счет образования при захлопывании пузырьков свободных радикалов и приводит к интенсификации химических процессов в жидкости. При этом существенно активизируется действие химических компонентов моющего раствора, что позволяет сократить время технологического процесса очистки и уменьшить количество расходуемых моющих средств.

При интенсивности ультразвуковых колебаний более 10 Вт/см^2 кавитационные пузырьки, образующиеся в фазе разряжения, из-за больших амплитудных значений звукового давления не успевают в фазе сжатия захлопнуться, а продолжают колебаться в такт с ультразвуковой волной, постепенно увеличиваясь в размерах до наблюдаемых невооруженным глазом. От излучающей поверхности ультразвукового излучателя отходят интенсивные кавитационные течи, образованные паро-газовыми пузырьками. Колебания таких пузырьков приводят к возникновению интенсивных микротечений в объеме технологического моющего раствора. Моющий раствор переходит в некое трясущееся динамическое состояние. При этом жировые загрязнения интенсивно удаляются за счет растворения и смывания интенсивными микропотоками моющего раствора. При этом очищаемая поверхность ткани, оставаясь неподвижной, механически не деформируется и не повреждается.

При испытаниях высокая интенсивность ультразвука достигалась за счет оснащения ультразвукового резонансного привода-излучателя трансформатором колебательной скорости. При этом амплитуда колебаний рабочей поверхности привода достигала 25 мкм , а плотность ультразвуковой энергии составляла $0,1 \text{ Вт/см}^3$. К приводу подводилась мощность 100 Вт .

Из описанного следует, что эффективность технологического процесса ультразвуковой кавитационной очистки эластичных поверхностей зависит, прежде всего, от размеров образующихся кавитационных пузырьков и их общего количества. Для одновременного насыщения кавитационной об-

ласти мелкими пузырьками с повышенной эрозионной активностью и колеблющимися большими пузырьками, создающими интенсивные микротечения, целесообразно использовать ультразвуковые приводы с развитой поверхностью излучения.

Развитая поверхность излучения такого привода позволяет подвести к технологическому объему ультразвуковые колебания гораздо большей мощности, что необходимо при создании установок промышленного применения.

Кроме расширения диапазона амплитуд звукового давления необходимо обеспечить и расширение спектра частот, вводимых в жидкость колебаний. Это можно обеспечить введением модуляции излучаемых колебаний по частоте, амплитуде или фазе.

ВЫВОДЫ

Экспериментально подтверждена целесообразность и перспективность применения ультразвуковой кавитации в технологическом процессе очистки эластичных поверхностей. При этом для удаления затвердевших загрязнений необходимо воспользоваться эрозионной активностью кавитационной среды при интенсивности колебаний до 10 Вт/см^2 , а для удаления жировых загрязнений воспользоваться ультразвуковыми колебаниями с интенсивностью более 10 Вт/см^2 .

Обоснована целесообразность создания технологического оборудования для кавитационной очистки с использованием низких ультразвуковых частот.

Показано, что кавитационная обработка уменьшает прочность ткани аналогично традиционной барабанной очистке, то есть не более, чем на 23% за 30 циклов обработки. При этом, в отличие от традиционной барабанной очистки, при кавитационной техно-

логии ткань не деформируется механически, а находится в статическом состоянии, что позволяет применять ее при обработке ажурных изделий из тонких тканей.

Эффективность технологического процесса ультразвуковой кавитационной очистки эластичных поверхностей может быть повышена за счет применения резонансных приводов-излучателей с развитой поверхностью излучения, а также за счет применения модуляции излучаемых колебаний по частоте, амплитуде или фазе.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Федоткин И.М., Гулый И.С. Кавитация. Кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Часть 1.- К.: Полиграфкнига, 1997. – 839 с.
- [2] Хмелев В.Н., Попова О.В. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве. Барнаул: Алт.гос. техн. Ун-т, 1997. – 160 с.
- [3] Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А. Ф. Луговской, Н. В. Чухраев. - К. : ВПЦ «Київ. ун-т», 2007. - 244 с.
- [4] Яхно О.М. Исследование возможностей технологии ультразвуковой кавитационной очистки эластичных поверхностей / О.М. Яхно, Е.А. Луговская, А.В. Мовчанюк // - Вісн. Нац. техн. ун-ту України “Київ. політехн. ін-т” : серія “Машинобудування”. - 2010. - № 58. - С.234-240.
- [5] Тельфер Ф.П. Оборудование предприятий химчистки и прачечного производства / Ф. П. Тельфер, В. П. Буданов. – М. : Легкая индустрия, 1978. – 320 с.
- [6] Эльпинер И.Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие. - М. : Физматиз, 1963. – 430 с.
- [7] Хорбенко И.Г. Ультразвук в машиностроении. М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
- [8] Зарембо Л.Н., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. – 519с.
- [9] Перник А.Д. Проблемы кавитации. Л.: Судостроение, 1988. – 438с.