

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №1 (127). С. 21-28.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №1 (127). P. 21-28.

Обзорная статья
УДК 621.9.048.6
doi:10.30987/2223-4608-2022-1-21-28

Ультразвуковая очистка. Состояние и перспективы

Вячеслав Михайлович Приходько¹, д.т.н., чл-кор. РАН,
Равиль Исламович Нигметзянов², к.т.н., Дмитрий Сергеевич Фатюхин³, д.т.н.,
Александр Юрьевич Крамаренко⁴, магистрант,
Александр Андреевич Нечай⁵, лаборант

^{1,2,3,4,5}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия

¹prikhodko@madi.ru

²lefmo@yandex.ru

³mitriy2@yandex.ru

⁴akramarenkoa@yandex.ru

⁵nechayaa@yandex.ru

Аннотация. Приведён краткий обзор современных исследований по технологии ультразвуковой очистки.

Ключевые слова: ультразвук, очистка, кавитация, акустические потоки

Благодарность: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 21-19-00660, <https://rscf.ru/project/21-19-00660/>.

Для цитирования: Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Фатюхин Д.С., Крамаренко А.Ю., Нечай А.А. Ультразвуковая очистка. Состояние и перспективы // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №1 (127). – С. 21-28. doi:10.30987/2223-4608-2022-1-21-28.

Review article

Vyacheslav M. Prikhodko, IRDR, Member of the Russian Academy of Sciences,
Ravil I. Nigmatzyanov, Cand. Sc. Engineering, **Dmitry S. Fatyukhin**, IR DR
Alexander Yu. Kramarenko, Master's student
Alexander A. Nechay, laboratory assistant

Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Ultrasonic cleaning. Status and prospects

Annotation. A brief overview of modern research on ultrasonic cleaning technology is given.

Keywords: ultrasonic sound, cleaning, cavitation, acoustic streaming

Acknowledgements: The research was carried under the sponsorship of the Russian Science Foundation, Grand No. 21-19-00660, <https://rscf.ru/project/21-19-00660/>.

For citation: Prikhodko V.M., Nigmatzyanov R.I., Fatyukhin D.S., Kramarenko A.Yu., Nechay A.A. Ultrasonic Cleaning. Status and prospects. / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, No.1 (127), pp. 21-28. doi:10.30987/2223-4608-2022-1-21-28.

Введение

Ультразвуковая очистка является одним из самых высокоэффективных способов удаления

поверхностных загрязнений. Она основана на эффектах, возникающих в жидкой среде при введении высокочастотных колебаний.

Кавитация, акустические течения и звуко-

вое давление обеспечивают возможность очистки загрязнений различной степени адгезии и природы происхождения независимо от геометрической формы очищаемой поверхности.

Технология ультразвуковой очистки активно развивается с 1950 – 1960-х г.г. (Spencer, L.E. Efficient Cleaninig Methods // Metal Inds, 1957, 91, №2, p. 29; Rozenberg, L.D. On the physics of ultrasonic cleaning // Ultrasonic News, 1960, 4, №4, p. 16; Nolting, B.E., Nepairas, E.A. Cavitation produced by ultrasonics // Proc. Phys. Soc., 1950, 63B, №9, p. 674) и имеет широкое применение от медицины до машиностроения.

В настоящее время процесс детально исследован и ему посвящено огромное количество публикаций, в том числе по физике и механике процесса (Розенберг, Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука. Том 3. Физические основы ультразвуковой технологии // М.: Наука. – 1970. – 689 с.), применению очистки при высоких амплитудах колебаний и выбору технологической среды (Панов, А.П. Ультразвуковая очистка прецизионных деталей. – М., 1984. – 88 с.), физико-математическому моделированию (Modelling of cavitation erosion in the area of surfaces of smooth contact / V.M. Prikhodko, A.P. Buslaev, S.B. Norkin, M.V. Yashina // Ultrasonics Sonochemistry, 2001, 8(1), p. 59-67), особенностях расчёта и выбора излучающих инструментов [1] и т.д. (приведена лишь малая часть публикаций в качестве примера).

Тем не менее, развитие современных технологий, специфических процессов и повышение экологических требований обуславливают довольно высокую публикационную активность по рассматриваемой теме.

Далее приведён краткий обзор современных публикаций по данной теме. В обзоре использованы статьи, имеющие открытый доступ. Рисунки из зарубежных источников представлены без изменений с переводом терминов и обозначений.

Обзор современных исследований

В работе [2] представлены исследования по развитию кавитации в практических условиях. Для экспериментов использовалась водопроводная вода с различным газонасыщением и температурой. Для первичной дегазации в воду добавлялось 0,1 % Na_2SO_3 , эксперименты проводились в две серии: для холодной и горячей воды. Частота колебаний составляла 37 кГц.

Результаты исследований при мощности генератора 900 Вт показали, что наибольшая кавитационная активность достигается при 7 °С, далее происходит резкое снижение до достижения 20 °С после чего темпы снижения кавитационной активности замедляются. При обработке на более низких мощностях (570 и 50 Вт) появляется интервал температур, при котором кавитация практически не происходит, что объясняется возникновением условий, препятствующих преодолению порога кавитации (рис. 1). При этом с увеличением газонасыщения развитие кавитации также замедляется.

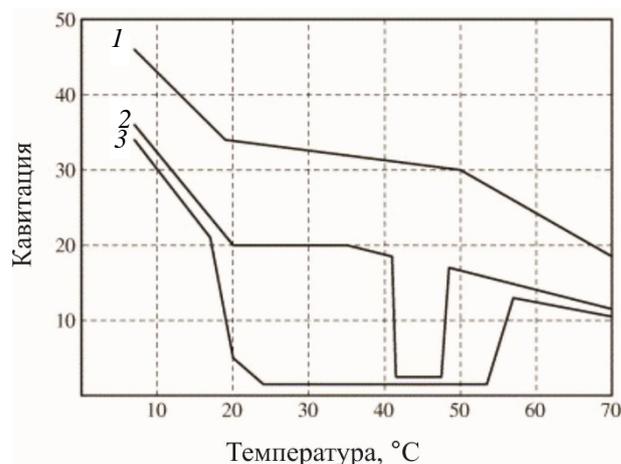


Рис. 1. Интенсивность кавитации водопроводной воды начальной температуры 5 °С, раскисленной с добавлением 0,1 % Na_2SO_3 , в зависимости от температуры, обработанной ультразвуком на различных уровнях мощности:

1 – ~900 Вт; 2 – ~570 Вт; 3 – ~530 Вт

Аналогичные результаты получены в работе [3]. В результате обработки тест-объектов из алюминиевой фольги при различных температурах отмечено снижение эрозионных повреждений при повышении температуры от 0 до 80 °С, что объясняется увеличением давления насыщенных паров с ростом температуры.

Также в данной работе проведены исследования зависимости эрозионной активности в зависимости от частоты колебаний. Наибольшее значения получены на частотах 16...22 кГц (рис. 2), что вызвано оптимальным соотношением количества пузырьков и энергией, выделяемой при их схлопывании.

Работы [3] и [4] посвящены снижению расхода воды и уменьшению загрязнения сточных вод при ультразвуковой очистке.

По утверждению авторов [3] традиционные методы ультразвуковой очистки с добавлением в технологическую среду поверхностно-

активных веществ образуют большое количество сточных вод. Для обеспечения рециркуляции воды предлагается совмещение ультразвуковой очистки с микропузырьковой обработкой. В качестве объекта исследований выбраны металлические поверхности с масляными загрязнениями. Микропузырьки воздуха получали методом гидродинамической кавитации. Совмещение методов позволило повысить эффективность очистки с 69 % до 85,5 % за 3 минуты обработки (рис. 3).

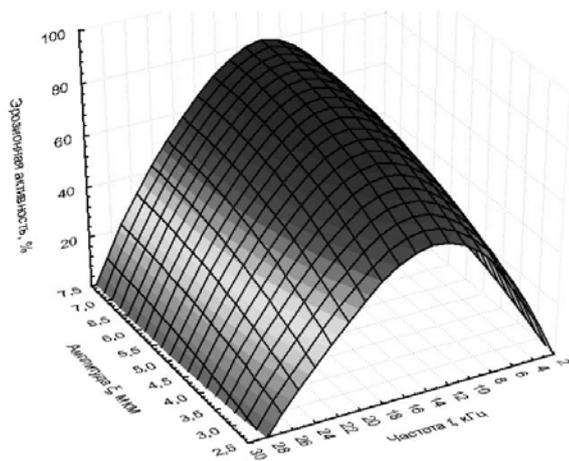


Рис. 2. Влияние частоты f колебаний ультразвука на эрозионную активность при различных амплитудах колебательных смещений излучателя ξ

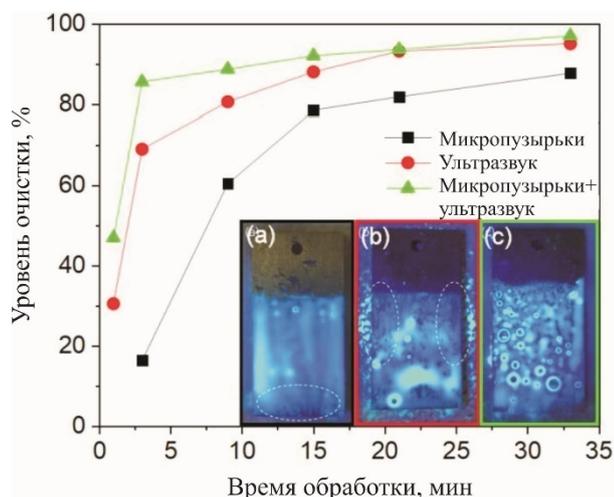


Рис. 3. Эффективность очистки масла при ультразвуковой очистке; очистке микропузырьками (поверхность из углеродистой стали; скорость 3 м/мин, температура 25 °С) и сочетание обоих методов

Применение предлагаемой технологии позволяет снизить образование эмульгированных масляных сточных вод, так как масло, которое прикрепляется к микропузырьку всплывает вместе с ним на поверхность в отличие от ка-

витационного пузырька, который при схлопывании создаёт эмульсию. Далее масляная плёнка удаляется с поверхности, что улучшает условия для дальнейшей рециркуляции воды.

В работе [4] основным недостатком ультразвуковой очистки названа необходимость погружения очищаемого изделия в ёмкость с технологической жидкостью, что не позволяет производить очистку закреплённых элементов и поверхностей, обладающих большими площадями (стены; полы; фасады и т.д.). Для решения проблемы предлагается метод очистки, заключающийся в использовании кавитации в плёнке моющего раствора, который наносится на поверхность. Пример реализации метода показан на рис. 4.



а)



б)

Рис. 4. Чистка пола без погружения с использованием чистящего устройства:

а – излучатели, собранные на тележке;

б – то же устройство, очищающее грязный пол

Для экспериментальной установки был специально изготовлен излучатель с закруглённым концом, резонансная частота колебаний которого составляла около 20 кГц. Эффективность метода оценивалась в сравнении с чисткой под давлением очистителем Kärcher HD 9/20 4 М. В результате исследований установлено, что предлагаемая технология требует в 115 раз меньше энергии и уменьшает расход воды в 15 раз. Недостатка-

ми технологии являются низкая скорость очистки 1 м/мин и необходимость ограничения зазора между инструментом и очищаемой поверхностью до 1 мм.

Вопросы ультразвуковой обработки крупногабаритных изделий и геометрически сложных изделий машиностроения рассмотрены в работе [5]. Определено, что наибольшую эффективность при очистке имеет стержневая колебательная система, но при этом её кавитационная область значительно ниже чем у плоскостных и цилиндрических систем. Для обеспечения возможности обработки крупногабаритных деталей разработан прототип установки (рис. 5).

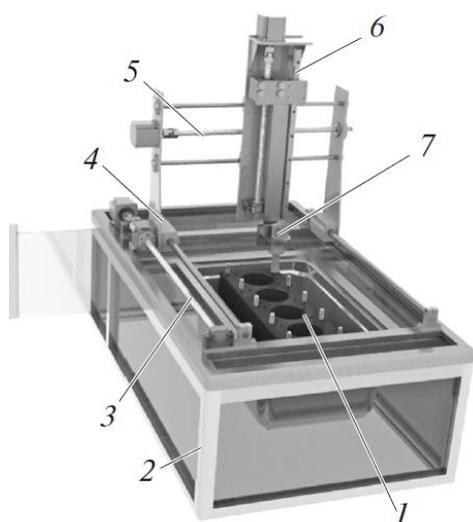


Рис. 5. Система ультразвуковой координатной очистки:

1 – очищаемый объект; 2, 3 – нижний и верхний модули; 4, 5, 6 – продольный, поперечный и вертикальный приводы источника ультразвука; 7 – источник ультразвука

Принцип работы основан на перемещении стержневой колебательной системы вдоль обрабатываемой поверхности. Перемещение осуществляется посредством шаговых двигателей и винтовых передач по 3-м координатам. Управление производится с компьютера,

что позволяет легко встроить процесс очистки в технологический процесс изготовления детали, так как все операции основаны на одной 3D-модели.

Технология увеличения площади очищаемой детали также рассмотрена в [6]. Показано, что помимо традиционных механизмов очистки – схлопывающихся пузырьков и акустических потоков, возможно использовать энергию пузырьковых образований, представляющие собой скоалесцировавшиеся многопузырьковые кластеры, которые легко переносятся крупномасштабным гидродинамическим потоком на значительные расстояния (рис. 6), где нет условий для их схлопывания.

Для активации запасённой в кластерах энергии предлагается доозвучивание технологического объёма низкоамплитудным источником колебаний, направленным противоположно основному высокоамплитудному источнику и располагающимся на расстоянии 150 мм. В результате эксперимента установлено возникновение 3-х зон обработки, обладающих эрозионной активностью: две зоны от излучателей и появляющаяся только при работе двух источников колебаний одновременно третья зона длиной порядка 100 мм. Полученная зона обладает несколько меньшей эрозионной активностью и образуется за счёт схлопывания кластеров. Технология позволяет увеличить зону эффективной ультразвуковой обработки до 5 раз, что важно для очистки глубоких отверстий, сложнопрофильных участков поверхностей и т.д.

Ещё одним исследованием, направленным на углубление понимания процессов и оптимизацию очистки, является работа [7]. Здесь произведено сравнение эффекта очистки газовыми и паровыми пузырьками в отдельности. Пузырьки газа и пара различаются по порогу кавитации, длительности жизненного цикла и силой воздействия. Исследование основывалось на данных высокоскоростной видеосъёмки (рис. 7).

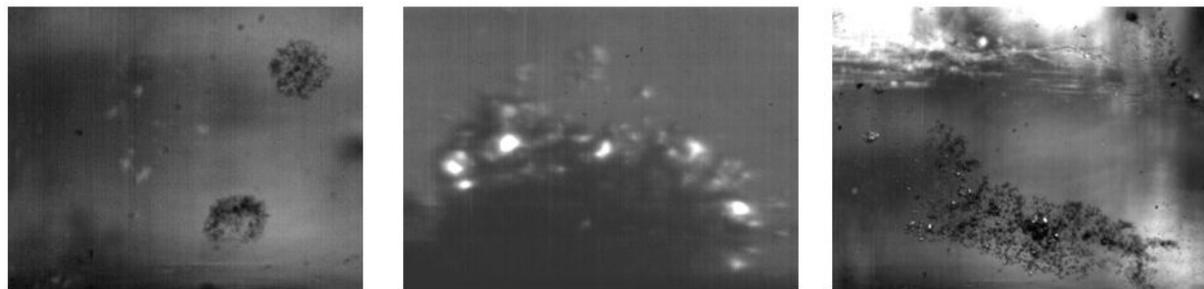


Рис. 6. Кадры скоростной видеосъёмки кавитационных образований

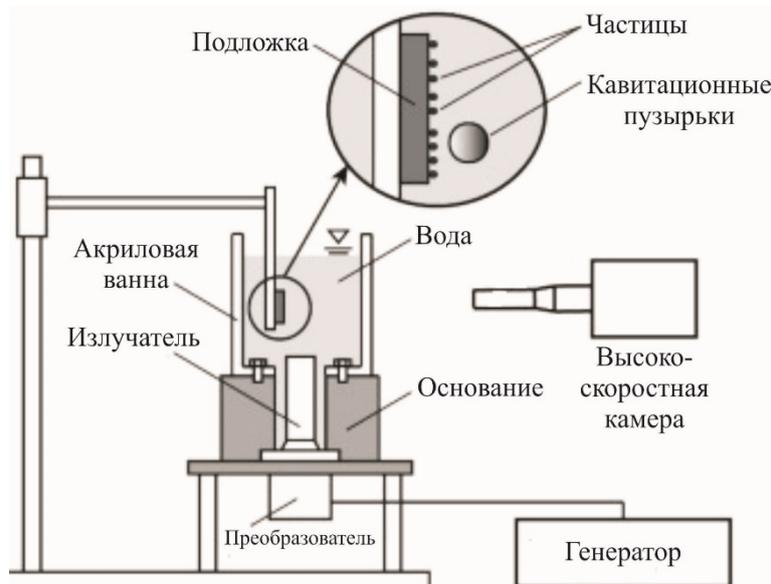


Рис. 7. Экспериментальная установка

Установлено, что газовые пузырьки перемещаются по подложке в течение относительно долгого времени и очищают замкнутые области вблизи траектории, а паровые пузырьки очищают поверхность за счёт энергии схлопывания. Наблюдения показывают, что пузырьки пара и газа эффективны для очистки загрязнений с сильной и слабой адгезией соответственно. Для очистки гидрофобных субстратов могут применяться только газовые пузырьки.

Авторами [8] проведены экспериментальные исследования по удалению материала поддержек, полученных при 3D-печати изделий из материалов, отверждающихся при ультрафиолетовом излучении. Применение ультразвука позволяет обрабатывать труднодоступные участки расположения поддержек. Фотографии образцов, имитирующих поддержки, растворяемые в различных условиях, представлены на рис. 8.

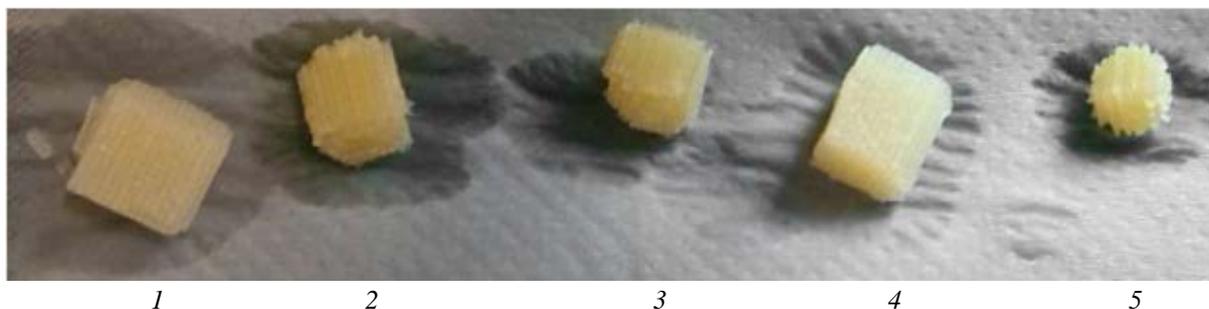


Рис. 8. Опытные образцы материала после 1 ч процессов растворения:

1 – с 10 мл деминерализованной воды; 2 – 0,6 г NaOH, растворенного в 10 мл деминерализованной воды; 3 – 0,6 г NaOH, растворенного в 10 мл деминерализованной воды, выдержанной при 30 °С; 4 – с 10 мл деминерализованной воды, помещенной в ультразвуковую ванну (при 30 °С) на 2×15 мин с промежутком 45 мин; 5 – 0,6 г NaOH, растворенного в 10 мл деминерализованной воды, с помещением в ультразвуковую ванну (при 30 °С) на 2×15 мин с промежутком 45 мин

Лучший результат показала обработка ультразвуком в растворе гидроксида натрия NaOH (образец №5). Обработка при резонансной частоте 45 кГц привела к потере массы с 1,0 до 0,32 г, в то время как без ультразвука

масса образца составила 0,47 г. В результате интенсификация химической реакции, а также возможность направленного действия, делают ультразвук эффективным средством для удаления поддержек при 3D-печати.

Исследование [9] посвящено применению известных положений по ультразвуковой жидкостной обработке для очистки керамиче-

ских мембран. Рассмотрены основные механизмы, позволяющие отделить загрязнения от поверхности мембран (рис. 9).

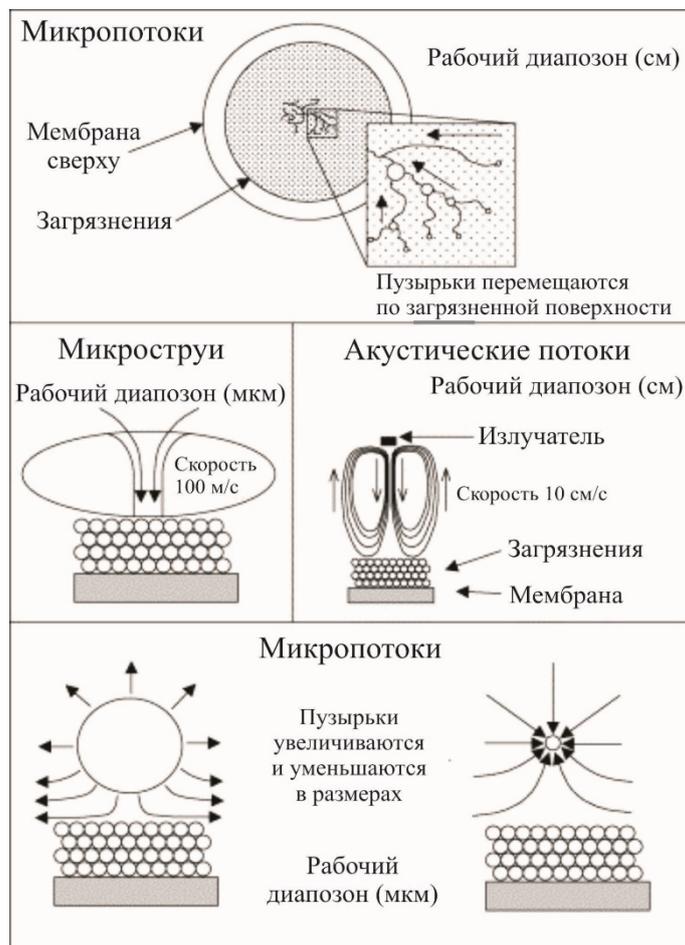


Рис. 9. Возможные механизмы ультразвуковой очистки

Во всех экспериментах использовались керамические мембраны Anodisc из γ -оксида алюминия ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) диаметром 25 мм. Эта гомогенная мембрана толщиной 60 мкм имеет одинаковый размер пор 0,2 мкм по всей мембране. Для загрязнения использовались частицы сульфатного полистирольного латекса, которые пропускali через мембрану.

В результате экспериментов установлено, что ультразвук в диапазоне частот 70...620 кГц позволяет осуществлять очистку без повреждения мембран. При этом эффективность очистки выше с уменьшением частоты, что объясняется авторами увеличением размера пузырьков и возрастанием энергии схлопывания. Механизм очистки представлен как разрушение загрязнений за счёт кавитации и дальнейший перенос их от поверхности акустическими течениями.

Применение ультразвука для очистки поверх-

ностей функциональных полупроводниковых элементов рассмотрено в [10]. Одной из проблем здесь является удаление абразивных наночастиц, образованных в результате химико-механического полирования. Учитывая малый размер, изменения в поверхности при обработке должны ограничиваться субнанометровым диапазоном. В результате, возможно использовать только сильно разбавленные химические вещества, что приводит к потере химической агрессивности и снижает эффективность очистки.

Применение ультразвуковых колебаний частотой 928 кГц позволяет интенсифицировать процесс за счёт приложения наномеханических сил к удаляемым частицам. На рассматриваемых частотах кавитация проявляется слабо и нестабильно, но при этом «мягкие» колебания не повреждают хрупкие наноскопические структуры поверхности. Для повы-

шения стабильности процесса предлагается осуществлять обработку в импульсном режиме, что обеспечивает частичное растворение и рециркуляцию активных пузырьков через резонанс между последовательными сериями волн. Также кавитационную активность возможно повысить, перенасыщая среду обработки газом. Зависимость эффективности очистки от длины импульса и времени обработки представлены на рис. 10.

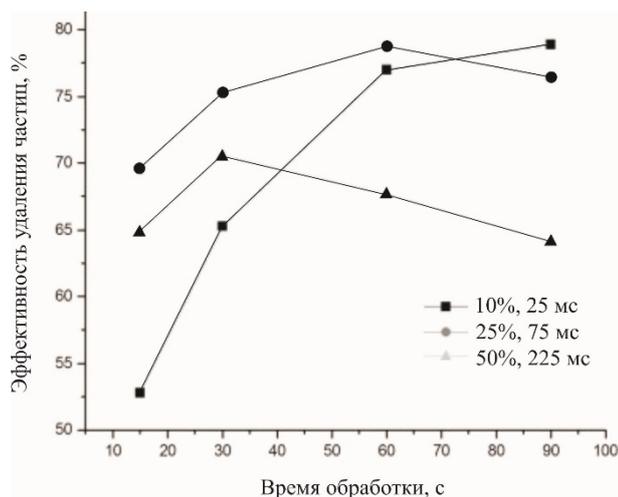


Рис. 10. Эффективность ультразвукового удаления частиц для времени обработки ультразвуком 15, 30, 60 и 90 с при мощности 10, 25 и 50 % от максимальной мощности генератора

Заключение

Современные исследования по технологии ультразвуковой очистки основаны на известных теоретических положениях, когда в качестве основных механизмов жидкостной обработки рассматриваются кавитация и акустические потоки.

Особенностью исследований является практикоориентированность, т.е. рассматривается конкретный процесс или тип деталей, для которых оптимизируются акустико-технологические параметры ультразвуковой очистки.

Перспективы развития технологии ультразвуковой очистки лежат в следующих направлениях исследований:

- применение ультразвука в различных климатических условиях;
- повышение экологичности процесса очистки за счёт уменьшения количества сточных вод и снижение в моющем растворе доли химреагентов;

– разработка технологий, позволяющих проводить очистку крупногабаритных и/или сложнопрофильных деталей, в том числе полученных аддитивными технологиями;

– адаптация процесса очистки для условий современного высокотехнологичного производства, например, мембранные технологии и наноэлектроника.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Инструменты** для ультразвуковой очистки: монография / В.Ф. Казанцев, Ю.Н. Калачёв, Р.И. Нигметзянов и др. // М.: Техполиграфцентр, 2017. – 181 с.

2. **Bogdan Niemczewski** Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions // *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 21, Issue 1, 2014, P. 354-359.

3. **Фатюхин, Д.С.** Экспериментальные исследования влияния параметров ультразвуковой очистки на величину кавитационной эрозии // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. – 2011. – № 4 (27). – С. 38-42.

4. **Microbubbles** for Effective Cleaning of Metal Surfaces Without Chemical Agents / Li Pan and Wang, JiaHao and Liao, Zheng Hao and Ueda, Yoshikatsu and Yoshikawa, Kiyoshi and Zhang, Guo Xing // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021.

5. **Sarasua Miranda, J.A., Ruiz-Rubio, L., Aranzabe-Basterrechea, E., Vilas-Vilela, J.L.** Non-Immersion Ultrasonic Cleaning: An Efficient Green Process for Large Surfaces with Low Water Consumption. *Processes* 2021, 9, p. 585.

6. **Ultrasound** Treatment of Curved Contours and Complex Surfaces / Kazantsev, V.F., Kuznetsov, S.Y., Sundukov, S.K. et al. // *Russian Engineering Research*, 2017, 37, p. 1074-1076.

7. **Improvement** in Ultrasound Liquid Machining by Activating Cavitation Clusters / Nigmatzyanov, R.I., Kazantsev, V.F., Prikhod'ko, V.M. et al. // *Russian Engineering Research*, 2019, 39, p. 699-702.

8. **Comparing** cleaning effects of gas and vapor bubbles in ultrasonic fields / Ryeol Park, Minsu Choi, Eun Hyun Park, Won-Jun Shon, Ho-Young Kim, Wonjung Kim // *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, Vol. 76, 105618.

9. **Ultrasonic** cleaning of 3D printed objects and Cleaning Challenge Devices / Bram Verhaagen, Thijs Zanderink, David Fernandez Rivas // *Applied Acoustics*, 2016, Vol. 103, Part B, P. 172-181.

10. **Mechanisms** and factors influencing the ultrasonic cleaning of particle-fouled ceramic membranes / Mikko O. Lamminen, Harold W. Walker, Linda K. Weavers // *Journal of Membrane Science*, 2004, Vol. 237, Issues 1-2, P. 213-223.

11. **Enhancement** of cavitation activity and particle removal with pulsed high frequency ultrasound and supersaturation / M. Hauptmann, F. Frederickx, H. Struyf, P. Mertens, M. Heys, S. De Gendt, C. Glorieux, S. Brems. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, Vol. 20, Issue 1. P. 69-76.

REFERENCES

1. Tools for ultrasonic cleaning: monograph / V.F. Kazantsev, Yu.N. Kalachev, R.I. Nigmatzyanov, et al. /Moscow: Techpoligrafstenter, 2017, 181 p.
2. Bogdan Niemczewski Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions // UltrasonicsSonochemistry, Vol. 21, Issue 1, 2014, P. 354-359.
3. Fatyukhin, D.S. Experimental studies of the influence of ultrasonic cleaning parameters on the amount of cavitation erosion. / Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), 2011, No. 4 (27), pp. 38-42.
4. Microbubbles for Effective Cleaning of Metal Surfaces Without Chemical Agents / Li Pan and Wang, JiaHao and Liao, Zheng Hao and Ueda, Yoshikatsu and Yoshikawa, Kiyoshi and Zhang, Guo Xing // UltrasonicsSonochemistry, 2021.
5. Sarasua Miranda, J.A., Ruiz-Rubio, L., AranzabeBasterrechea, E., Vilas-Vilela, J.L. Non-Immersion Ultrasonic Cleaning: An Efficient Green Process for Large Surfaces with Low Water Consumption. Processes 2021, 9, p. 585.
6. Ultrasound Treatment of Curved Contours and Complex Surfaces / Kazantsev, V.F., Kuznetsov, S.Y., Sundukov, S.K. et al. // Russian Engineering Research, 2017, 37, p. 1074-1076.
7. Improvement in Ultrasound Liquid Machining by Activating Cavitation Clusters / Nigmatzyanov, R.I., Kazantsev, V.F., Prikhod'ko, V.M. et al. // Russian Engineering Research, 2019, 39, p. 699-702.
8. Comparing cleaning effects of gas and vapor bubbles in ultrasonic fields / Ryeol Park, Minsu Choi, Eun Hyun Park, Won-Jun Shon, Ho-Young Kim, Wonjung Kim // UltrasonicsSonochemistry, 2021, Vol. 76, 105618.
9. Ultrasonic cleaning of 3D printed objects and Cleaning Challenge Devices / Bram Verhaagen, Thijs Zanderink, David Fernandez Rivas // Applied Acoustics, 2016, Vol. 103, Part B, P. 172-181.
10. Mechanisms and factors influencing the ultrasonic cleaning of particle-fouled ceramic membranes / Mikko O. Lamminen, Harold W. Walker, Linda K. Weavers // Journal of Membrane Science, 2004, Vol. 237, Issues 1-2, P. 213-223.
11. Enhancement of cavitation activity and particle removal with pulsed high frequency ultrasound and supersaturation / M. Hauptmann, F. Frederickx, H. Struyf, P. Mertens, M. Heyns, S. De Gendt, C. Glorieux, S. Brems. UltrasonicsSonochemistry, 2013, Vol. 20, Issue 1. P. 69-76.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.11.2021; одобрена после рецензирования 01.12.2021; принята к публикации 10.12.2021.

The article was submitted 18.11.2021; approved after reviewing 01.12.2021; accepted for publication 10.12.2021.

