

## Применение гибких волноводов для виброакустического мониторинга технологических процессов в вакуумных камерах

Михаил Павлович Козочкин<sup>1</sup>, Фан Сагирович Сабилов<sup>2</sup>✉

<sup>1, 2</sup> Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия

<sup>1</sup>[astra-mp@yandex.ru](mailto:astra-mp@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4928-7025>

<sup>2</sup>[fanira5057@yandex.ru](mailto:fanira5057@yandex.ru)✉, <https://orcid.org/0000-0002-1759-5341>

**Аннотация.** Проанализированы сложности реализации технологических процессов в вакуумных камерах – мощные электромагнитные помехи, малые габаритные размеры камеры и труднодоступность рабочего пространства. Показана актуальность методов оперативного мониторинга таких процессов. Описан контроль виброакустических сигналов с помощью систем мониторинга, которые позволяют получать информацию о ходе технологического процесса, состоянии инструмента, необходимости коррекции режимов обработки и т. п. Рассмотрены ситуации, когда контроль вибраций в рабочей зоне осложняется условиями процесса обработки, например, при электронно-пучковом легировании в вакуумной камере. Исследована возможность получения виброакустической информации из рабочей зоны вакуумной камеры с помощью гибкого волновода и приведены результаты исследования. Оценены частотные характеристики гибких волноводов и возможности их использования для мониторинга технологических процессов с труднодоступной зоной обработки. Проанализировано влияние на коэффициент передачи волновода площади сечения волновода, уплотнения при входе в вакуумную камеру, а также дополнительного натяжения. Показаны перспективы использования гибких волноводов в труднодоступных местах рабочего пространства.

**Ключевые слова:** виброакустическая диагностика, мониторинг, вакуумная камера, электронно-пучковые технологии, гибкие волноводы, спектральный анализ, частотный диапазон, коэффициент передачи

**Для цитирования:** Козочкин М. П., Сабилов Ф. С. Применение гибких волноводов для виброакустического мониторинга технологических процессов в вакуумных камерах // Измерительная техника. 2022. № 3. С. 59–64. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-3-59-64>

**Финансирование:** настоящие исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках задания в сфере научной деятельности (проект № FSFS-2021-0003).

## Application of flexible waveguides for vibroacoustic monitoring of technological processes in vacuum chambers

Michail P. Kozochkin<sup>1</sup>, Fan S. Sabirov<sup>2</sup>✉

<sup>1, 2</sup> Moscow State University of Technology STANKIN, Moscow, Russia

<sup>1</sup>[astra-mp@yandex.ru](mailto:astra-mp@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4928-7025>

<sup>2</sup>[fanira5057@yandex.ru](mailto:fanira5057@yandex.ru)✉, <https://orcid.org/0000-0002-1759-5341>

**Abstract.** Monitoring of vibroacoustic signals accompanying various technological processes in many cases allows you to create monitoring systems that provide information about the progress of the process itself, about the condition of the tool, about the need to correct processing modes, etc. However, there are situations when vibration control in the working area is complicated by the conditions of the processing process itself. A vivid example of such a situation is electron-beam doping in a vacuum chamber. The article presents the results of research on the possibility of obtaining vibroacoustic information from the working area of a vacuum chamber using a flexible waveguide. The influence on the transmission coefficient of the waveguide of its cross-sectional area, the presence of a seal at the entrance to the vacuum chamber, additional tension is considered. The presented results speak about the prospects of using flexible waveguides in hard-to-reach places of the workspace.

**Keywords:** vibroacoustic diagnostics, monitoring, vacuum chamber, electron beam technologies, flexible waveguides, spectral analysis, frequency range, transmission coefficient

**Financion Support:** these studies were carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the assignment in the field of scientific activity (project no. FSFS-2021-0003).

**Введение.** Для мониторинга состояния режущего инструмента станков, работающих в автоматическом режиме, для получения информации о качестве процесса обработки и коррекции его режимов широко используются параметры виброакустических (ВА) сигналов, сопровождающих различные технологические процессы [1–3]. Для этих целей

в основном применяют акселерометры, которые значительно проще встраивать в технологическое оборудование, чем аппаратуру для контроля силовых и температурных параметров. Однако в ряде случаев невозможно установить акселерометр в непосредственной близости к зоне основного процесса. Такая ситуация возникает, когда и инструмент,

и заготовка совершают сложные перемещения, включающие круговые движения, или когда процесс обработки сопровождается интенсивными электромагнитными помехами. Примером такого процесса являются электронно-пучковые технологии, реализуемые в вакуумных камерах [4–6]. Высокий вакуум не позволяет выводить экранированные кабели за пределы камеры, а воздействие электронного импульса приводит не только к недопустимым помехам в работе аппаратуры, но и к её повреждению.

Управлять процессом поверхностного электронно-пучкового легирования достаточно сложно из-за существенного разброса параметров микросекундного импульса электронного пучка и нестабильности процесса его взаимодействия с обрабатываемым материалом. Это приводит к значительным

случайным изменениям, возникающим стихийно, независимо от системы управления. В этих условиях поиск путей создания систем мониторинга технологического процесса является актуальной задачей [4–9].

При попадании электронного пучка на поверхностный слой детали происходит быстрый локальный разогрев материала до температуры испарения. Это вызывает изменения структуры поверхности, сопровождаемые изменением объёма вещества, что порождает пластические деформации и волны напряжений, распространяющиеся во всём объёме заготовки. Быстрое испарение вещества создаёт реактивное давление на заготовку, что тоже является источником ВА-сигналов [10, 11].

Структура электронного пучка характеризуется случайным распределением энергии по облучаемой поверхности, т. е. процесс облучения нестабилен относительно получаемых результатов. Оценить эти результаты можно только с помощью лабораторных исследований вне вакуумной камеры. В связи с этим мониторинг качества подаваемых импульсов в реальном времени может сократить время отладки технологических режимов, повысить производительность и качество выпускаемой продукции [11–13].

Целью настоящей работы является оценка частотных характеристик гибких волноводов и возможности их использования для мониторинга технологических процессов с труднодоступной зоной обработки.

**Предварительные эксперименты с гибкими волноводами.** Установка виброизмерительной аппаратуры внутри вакуумной камеры невозможна по причинам, оговоренным выше. В связи с этим в эксперименте применяли гибкий волновод в виде проволоки, что позволило перемещать столик с заготовками внутри камеры, а также устанавливать акселерометр и необходимую аппаратуру на достаточном расстоянии от источника электромагнитных помех. На рис. 1 показана схема стенда на базе установки для поверхностного легирования «РИТМ-СП» [14] с каналом для регистрации ВА-сигналов [9]. Один конец волновода механически прикрепляли к упругой системе с установленной заготовкой, другой – после прохождения через вакуумный ввод на расстоянии 1,5–2 м прикрепляли к приёмной пластине с установленным на ней акселерометром.

Первые эксперименты показали, что подача электронных пучков в виде коротких импульсов длительностью 4 мкс позволяет фиксировать ВА-сигнал в частотном диапазоне 0,005–40 кГц. При длительности импульса 4 мкс ВА-сигнал наблюдается в течение 100–150 мс. На рис. 2 показан пример записи ВА-сигнала с волновода, изготовленного из медной проволоки длиной 1,5 м и сечением 2,3 мм<sup>2</sup>, в двух частотных диапазонах при воздействии на стальную пластину со слоем плёнки из NbHfTi. В течение 50 мс выделяется основная доля колебательной энергии, затем амплитуда колебаний плавно снижается до фонового уровня.

На рис. 3 показаны два амплитудных спектра ВА-сигнала, сопровождавшего облучение пластины из алюминия (1) и алюминия с покрытием плёнкой Ni+Cr (2).

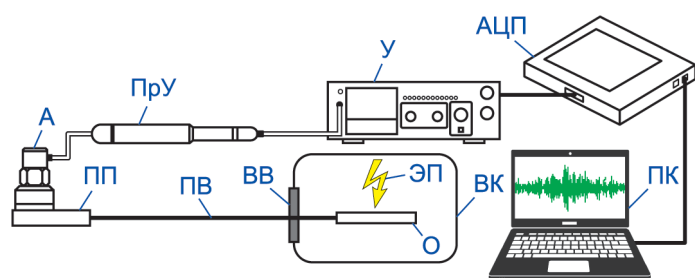


Рис. 1. Схема стенда на базе установки для поверхностного легирования «РИТМ-СП» с каналом для регистрации виброакустических сигналов:

О – испытуемый образец; ПВ – проволочный волновод; ПП – приёмная пластина; А – акселерометр КД-35 с магнитом; ПрУ – предусилитель; У – усилитель ВШВ-003; АЦП – АЦП Е440; ПК – регистрирующий персональный компьютер; ВВ – вакуумный ввод; ВК – вакуумная камера (корпус); ЭП – электронная пушка

Fig. 1. Scheme of the stand based on the installation for surface alloying «РИТМ-СП» with a channel for recording vibroacoustic signals:  
TS – test sample; WW – wire waveguide; RP – receiving plate; A – accelerometer KD-35 with a magnet; PAmpl – preamplifier; Amp – amplifier «ВШВ-003»; ADC – analog-to-digital converter E440; PC – recording computer; VI – vacuum input; VC – housing of the vacuum chamber; EG – electron gun

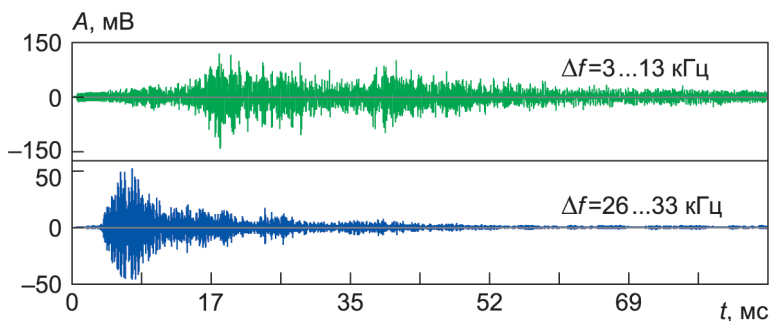


Рис. 2. Амплитуда ВА-сигнала в двух частотных диапазонах после передачи по проволочному волноводу при воздействии электронного импульса на стальную пластину со слоем плёнки из NbHfTi

Fig. 2. Recording of the change in the amplitude of the VA signal in two frequency ranges under the action of an electron pulse on a steel plate with a layer of NbHfTi film, obtained using a wire waveguide

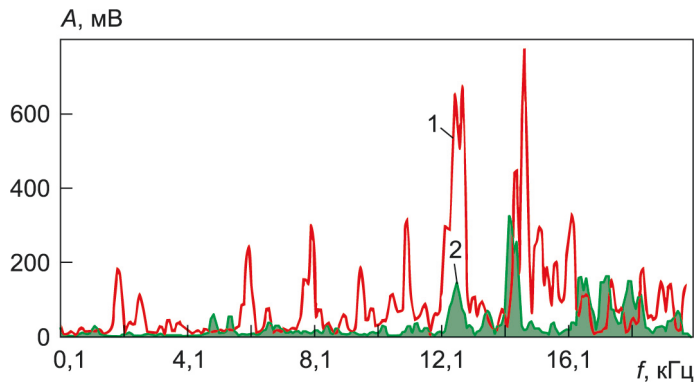


Рис. 3. Сравнение спектров ВА-сигналов в диапазоне 0,1–20 кГц при облучении пластины из алюминия без покрытия (1) и с покрытием плёнкой Ni+Cr (2)

Fig. 3. Comparison of the spectra of VA signals in the range of 0.1–20 kHz when an aluminum plate is irradiated (1) and coated with a Ni+Cr film (2)

Изменение материала покрытия приводит к формированию другого спектра ВА-сигнала, т. е. при изменении состава изменяются физико-химические процессы в покрытии и верхнем слое материала пластины, возникающие под воздействием потока энергии с большой плотностью мощности. Таким образом, применение длинного и тонкого волновода позволяет получать ВА-информацию из зоны обработки.

**Исследование частотных характеристик гибких волноводов.** Для оценки зависимости коэффициента передачи гибкого проволочного волновода от его сечения и натяжения проволоки и от уплотнения на выходе из вакуумной камеры поставили отдельный эксперимент. Цель эксперимента – сравнить коэффициенты передачи по гибкому волноводу при разных условиях и в разных частотных диапазонах. Две одинаковые цилиндрические болванки поочерёдно соединяли проволоками длиной 1 м и сечениями 0,8 и 2,3 мм<sup>2</sup>. На каждой болванке устанавливали акселерометр в двух позициях. На поверхности одной из болванок создавалось возмущающее воздействие (акселерометр находился в позиции 2). Акселерометр на одной болванке измерял ВА-сигнал около места возмущения (позиция 2), а акселерометр на другой – после прохождения по волноводу сечением 0,8 или 2,3 мм<sup>2</sup> (позиция 1). Возмущающее воздействие представляло собой фрикционный контакт [15]. Применение динамометрического молотка не позволяло создавать возмущение в широком диапазоне частот, поэтому использовали фрикционное воздействие на поверхность болванки с помощью напильника, перемещающегося возвратно-поступательно на длину 100 мм с периодом двойного хода 0,67 с. Коэффициент передачи  $K_p$  (transmission ratio  $K_r$ ) в экспериментах оценивали как отношение эффективного значения амплитуды ВА-сигнала в выбранной полосе частот приёмного акселерометра (позиция 1) к аналогичной амплитуде ВА-сигнала, снимаемого на позиции 2 с источником возмущения.

На рис. 4 сравниваются спектры ВА-сигналов двух акселерометров: спектр 1 – ВА-сигнал проходил через волновод сечением 0,8 мм<sup>2</sup>; спектр 2 – ВА-сигнал снимался рядом с

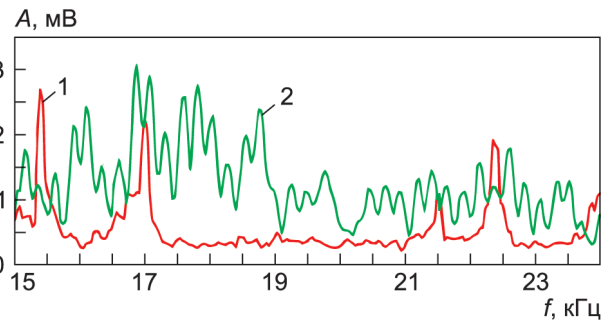


Рис. 4. Сравнение спектров ВА-сигнала, полученных с использованием волновода сечением 0,8 мм<sup>2</sup> (1) и без него (2)

Fig. 4. Comparison of VA signal spectra when using a waveguide with a cross section of 0.8 mm<sup>2</sup> (1) and without a waveguide (2)

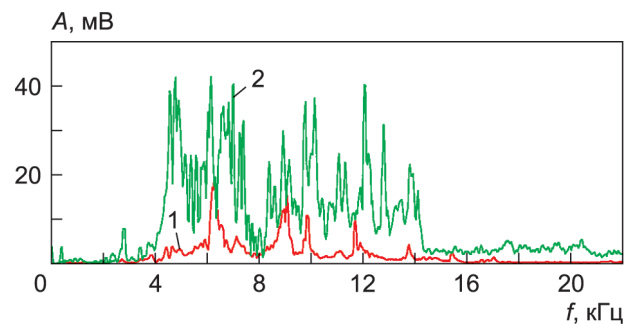


Рис. 5. Сравнение спектров ВА-сигнала после передачи по волноводом сечениями 0,8 (1) и 2,3 мм<sup>2</sup> (2)

Fig. 5. Comparison of VA signal spectra when using a waveguide with a cross section of 0.8 mm<sup>2</sup> (1) and with a cross section of 2.3 mm<sup>2</sup> (2)

источником возмущения. Амплитуды ВА-сигналов близки друг к другу только в отдельных узких частотных диапазонах. Для остальных частот амплитуда спектра 1 значительно меньше амплитуды спектра 2. На рис. 5 сравниваются спектры, полученные в одинаковых условиях, но с разными волноводами. Спектр ВА-сигнала, прошедшего через волновод сечением 2,3 мм<sup>2</sup> (спектр 2), как и спектры 1 на рис. 4, 5, состоит из множества локальных максимумов, но они расположены в частотном диапазоне более плотно, чем в спектре сигнала, прошедшего через волновод сечением 0,8 мм<sup>2</sup>. Положение локальных максимумов определяется собственными частотами всего канала наблюдения, который включает гибкие волноводы и обе болванки. По виду получаемых спектров ВА-сигнала можно заключить, что такие каналы наблюдения нельзя использовать в качестве средства измерений, но можно применять как средство мониторинга за ходом технологических процессов при соблюдении определённых условий. К таким условиям относятся следующие: частотную полосу для наблюдения за ВА-сигналом необходимо заранее экспериментально выбирать; границы частотной полосы и позиции акселерометров должны быть постоянными для мониторинга конкретного технологического процесса; ширина выбираемой частотной полосы должна быть достаточной для попадания в неё нескольких собственных частот канала наблюдения. Другие

требования не отличаются от общепринятых при использовании методов ВА-мониторинга.

По результатам исследований двух проволочных волноводов рассчитали коэффициенты передачи  $K_n$  как отношение эффективных амплитуд ВА-сигнала на приёмном акселерометре к амплитуде на акселерометре, установленном рядом с позицией возмущающего воздействия, для различных частотных полос  $\Delta f$ . В таблице представлены значения коэффициентов передачи  $K_n^{0,8}$ ,  $K_n^{2,3}$  для волноводов с сечениями соответственно 0,8 и 2,3 мм<sup>2</sup> в разных полосах частот  $\Delta f$ .

**Обсуждение полученных результатов.** Согласно таблице наблюдается большой разброс значений коэффициентов передачи. Это обусловлено неравномерностью распределения собственных частот в канале наблюдений. ВА-сигнал, прошедший через волновод с большим сечением, имеет больше локальных максимумов (см. рис. 5) и, соответственно, больше полос с высокими значениями  $K_n$ . Очень низкие значения  $K_n$  не означают, что их нельзя использовать для мониторинга

Коэффициенты передач для разных частотных полос и волноводов сечениями 0,8 и 2,3 мм<sup>2</sup>

| $\Delta f$ , кГц | $K_n^{0,8} \cdot 10^{-3}$ | $K_n^{2,3} \cdot 10^{-3}$ | $\Delta f$ , кГц | $K_n^{0,8} \cdot 10^{-3}$ | $K_n^{2,3} \cdot 10^{-3}$ |
|------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| 0,28–0,35        | 83,0                      | 17,0                      | 2,80–3,54        | 3,9                       | 4,2                       |
| 0,35–0,45        | 3,0                       | 6,0                       | 3,54–4,50        | 6,4                       | 7,2                       |
| 0,45–0,56        | 33,0                      | 107,0                     | 4,50–5,60        | 4,8                       | 7,9                       |
| 0,56–0,71        | 33,0                      | 103,0                     | 5,60–7,10        | 1,6                       | 68,4                      |
| 0,71–0,90        | 1,3                       | 2,5                       | 7,10–9,00        | 1,3                       | 82,3                      |
| 0,90–1,10        | 1,4                       | 1,6                       | 9,00–11,20       | 3,4                       | 279,0                     |
| 1,10–1,40        | 1,0                       | 1,1                       | 10,00–15,00      | 1,0                       | 138,0                     |
| 1,40–1,80        | 4,7                       | 44,3                      | 15,00–20,00      | 0                         | 422,8                     |
| 1,80–2,24        | 5,2                       | 49,3                      | 20,00–30,00      | 0                         | 184,2                     |
| 2,24–2,80        | 4,0                       | 4,4                       | 30,00–40,00      | 0                         | 23,5                      |

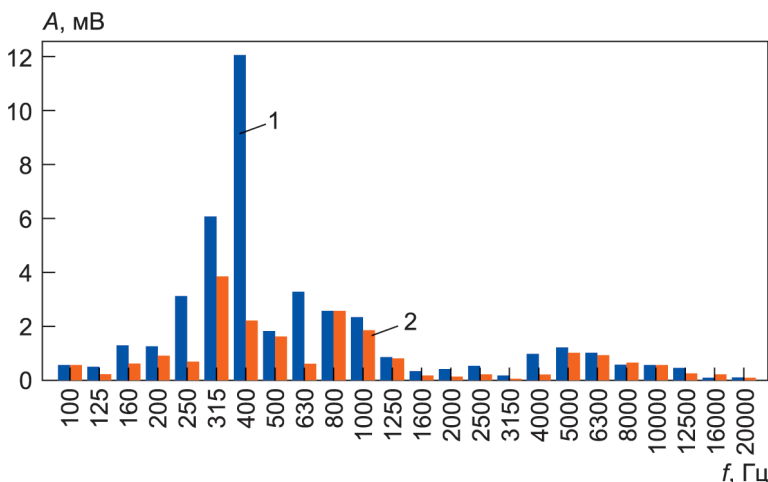


Рис. 6. Третьооктавные спектры ВА-сигнала после передачи по волноводу сечением 2,3 мм<sup>2</sup> без уплотнения (1) и с уплотнением (2)

Fig. 6. One-third-octave spectra of the VA signal after transmission through a waveguide with a cross section of 2.3 mm<sup>2</sup> without seal (1) and with seal (2)

технологического процесса, но необходимо проверять возможность выделения полезного сигнала на фоне помех. Например, в таблице в полосах с высокими значениями частоты для волновода сечением 0,8 мм<sup>2</sup> коэффициент передачи  $K_n=0$ . Там полезный сигнал не выделялся на фоне помех.

Сечения 0,8 и 2,3 мм<sup>2</sup> волноводов из практических соображений являются граничными: проволочный волновод тоньше 0,8 мм<sup>2</sup> практически не имеет смысла, а проволока сечением больше 2,3 мм<sup>2</sup> неудобна в эксплуатации из-за большой жёсткости.

На коэффициенты передачи волновода также оказывают влияние уплотнения проволоки. Самое сильное влияние будет в окрестности частот, пучности формы колебаний (максимумы амплитуды) которых приходится на позицию уплотнения. Эксперименты показали, что уплотнение тонкого волновода сказывается самым негативным образом: коэффициент передачи снижается во много раз почти во всём частотном диапазоне. Для волновода с сечением 2,3 мм<sup>2</sup> это влияние значительно слабее. На рис. 6 представлены третьооктавные спектры при оценке влияния уплотнения на ВА-сигнал, передаваемый по гибкому волноводу сечением 2,3 мм<sup>2</sup>. Уплотнение имитировали резиновой шиной шириной 8 мм, зажимаемой с помощью переносных тисков. На практике расположение уплотнения относительно точек крепления волновода зависит от конструкции вакуумной камеры и положения приёмной аппаратуры. Вариации расположения уплотнения будут изменять частотную характеристику волновода различным образом, что необходимо учитывать заранее.

При использовании тонкого волновода с уплотнением особенно значительно снижались коэффициенты передачи в области высоких частот: в диапазоне частот выше 15 кГц амплитуда ВА-сигнала находится на уровне помех. Для волновода сечением 2,3 мм<sup>2</sup> уплотнение не приводит к падению амплитуд сигнала до уровня помех, но происходит смещение некоторых спектральных максимумов. Это связано с тем, что уплотнение изменяет частотные характеристики упругой системы. Однако при использовании на практике широких частотных диапазонов, в которые попадают несколько собственных частот упругой системы канала наблюдения, сохраняется возможность ВА-мониторинга с помощью такого волновода. В этом случае наблюдение за процессом ведётся на основании изменений эффективных амплитуд в разных, но достаточно широких частотных диапазонах, как это показано на рис. 2.

Также оценивали влияние натяжения гибкого волновода. На практике использовать натяжение волновода достаточно трудно. Для этого необходимо устанавливать на оборудование дополнительные конструкции, что нивелирует преимущества его применения – простота использования обычной проволоки. Эксперименты с волноводом 2,3 мм<sup>2</sup> показали, что натяжение волновода хотя и изменяет его частотную характеристику в сторону увеличения, но радикального роста коэффициентов передачи по всему частотному диапазону не происходит. Однако при необходимости

оснащения конструируемого оборудования гибкими волноводами полезно выбирать варианты с их натяжением.

**Заключение.** Актуальность работ по созданию систем оперативного мониторинга в вакуумных камерах обусловлена отсутствием в настоящее время наблюдаемости результатов воздействия электронных пучков на поверхность заготовок, труднодоступностью рабочего пространства и мощными электромагнитными помехами. В процессе исследований подтверждена возможность ВА-мониторинга процессов обработки с помощью гибких волноводов.

Эксперименты показали, что использование в качестве гибких волноводов проволоки с сечением до 2,3 мм<sup>2</sup> позволяет надёжно контролировать ВА-процессы в вакуумной камере при частотах до 40 кГц на расстоянии более 2 м без предварительного натяжения волновода. Уплотнение волновода достаточного сечения на выходе из вакуумной камеры в основном уменьшает коэффициенты передачи на некоторых частотах, но это незначительно сказывается на возможности ВА-мониторинга.

Использование длинных и относительно тонких волноводов существенно изменяет частотную характеристику канала наблюдения. Это требует соблюдения определенных условий при создании систем мониторинга. В частности, необходимо экспериментально проверять ширину частотного диапазона, в котором амплитуды сигнала вибраций выделяются на фоне помех после прохождения электронного импульса. Эксперименты показали, что верхняя частота виброакустического сигнала уменьшается с увеличением длины волновода и с уменьшением его сечения, что частотный диапазон 0,005–40 кГц несёт достаточно информации, чтобы наблюдать за производительностью технологического процесса и ходом химических реакций и своевременно корректировать режимы обработки.

#### Список источников

1. Григорьев С. Н., Козочкин М. П., Федоров С. В., Порватов А. Н., Окунькова А. А. Исследование процесса электроэрозионной обработки средствами виброакустической диагностики // Измерительная техника. 2015. № 8. С. 33–36.
2. Козочкин М. П., Гусев А. В., Порватов А. Н. Разработка мобильных систем для мониторинга и диагностики станочных узлов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 3 (168). С. 20–23.
3. Козочкин М. П., Порватов А. Н. Оценка неопределённости при решении задач многопараметрической диагностики // Измерительная техника. 2015. № 2. С. 41–45.
4. Fedorov S. V., Kozochkin M. P., Maung T. H., *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1115, iss. 3, 032014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/3/032014>
5. Семашко Н. А., Шпорт В. И., Марин Б. Н. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. М.: Машиностроение, 2002. 240 с.
6. Смирнов А. Н. Генерация акустических колебаний в химических реакциях и физико-химических процессах // Российский химический журнал. 2011. Т. 454. С. 29–34.

7. Задумкин С. Н., Хоконов Х. Б., Шокаров Х. Б. Акустический эффект кристаллизации и плавления вещества // ЖЭТФ. 1975. Т. 68. № 4. С. 1315–1320.

8. Łazarska M., Wozniak T. Z., Ranachowski Z., Trafarski A., Domek G., *Met. Mater. Int.*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 426–433. <https://doi.org/10.1007/s12540-017-6347-z>

9. Fedorov S. V., Kozochkin M. P., Stebulyanin M. M., *Mechanics & Industry*, 2018, vol. 19, no. 7, 702. <https://doi.org/10.1051/MECA/2018050>

10. Федоров С. В., Оганян Г. В. Особенности электронно-лучевого легирования сменных многогранных пластин из твердого сплава при комплексной поверхностной обработке // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015, № 10 (724). С. 45–49.

11. Fedorov S. V., Min Htet Swe, Kapitanov A. V., Egorov S. B., *Mechanics & Industry*, 2017, vol. 18, no. 7, 710. <https://doi.org/10.1051/MECA/2017053>

12. Вершинин Г. А., Волков В. А., Бухбиндер Г. Л., Геринг Г. И. Локально-неравновесный массоперенос в двухкомпонентной системе при внешнем импульсном воздействии потоками энергии // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 7. С. 98–103. <https://doi.org/10.7868/S020735281407021X>

13. Полещенко К. Н., Вершинин Г. А., Геринг Г. И. и др. Модифицирование структуры и свойств твердых сплавов системы WC-Co сильноточными пучками заряженных частиц // Вестник Омского университета. 1996. № 2. С. 39–43.

14. Марков А. Б., Миков А. В., Озур Г. Е., Падей А. Г. Установка РИТМ СП для поверхностного легирования // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 6. С. 122–126.

15. Козочкин М. П. Виброакустический мониторинг фрикционного контакта при шлифовании // Трение и износ. 2017 (38). № 4. С. 386–391.

#### References

1. Grigor'ev S. N., Kozochkin M. P., Fedorov S. V., Porvatov A. N., Okun'kova A. A., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 8, pp. 878–884. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0811-2>
2. Kozochkin M. P., Gusev A. V., Porvatov A. N., Development of mobile systems for monitoring and diagnostics of machine units, *Handbook. Engineering magazine with application*, 2011, no. 3 (168), pp. 20–23. (In Russ.)
3. Kozochkin M. P., Porvatov A. N., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 173–178. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0681-7>
4. Fedorov S. V., Kozochkin M. P., Maung T. H., *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1115, iss. 3, 032014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/3/032014>
5. Semashko N. A., Shport V. I., Marin B. N., et al., *Acoustic emission in experimental materials science*, Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2002, 240 p. (In Russ.)
6. Smirnov A. N., Generation of acoustic oscillations in chemical reactions and physico-chemical processes, *Russian chemical journal*, 2001, vol. 45, pp. 29–33.

7. Zadumkin S. N., Khokonov Kh. B., Chakarov Kh. B., Acoustic effect of crystallization and melting of the substance, *JETP*, 1975, vol. 41, no. 4, pp. 653–655.
8. Łazarska M., Wozniak T. Z., Ranachowski Z., Trafarski A., Domek G., *Met. Mater. Int.*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 426–433. <https://doi.org/10.1007/s12540-017-6347-z>
9. Fedorov S. V., Kozochkin M. P., Stebulyanin M. M., *Mechanics & Industry*, 2018, vol. 19, no. 7, 702. <https://doi.org/10.1051/MECA/2018050>
10. Fedorov S. V., Oganyan G. V., *Metal Science and Heat Treatment*, 2016, vol. 57, no. 9–10, pp. 620–624. <https://doi.org/10.1007/s11041-016-9932-8>
11. Fedorov S. V., Min Htet Swe, Kapitanov A. V., Egorov S. B., *Mechanics & Industry*, 2017, vol. 18, no. 7, 710. <https://doi.org/10.1051/MECA/2017053>
12. Vershinin G. A., Volkov V. A., Buchbinder G. L., Gering G. I., *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 712–716. <https://doi.org/10.1134/S1027451014040193>
13. Pischasov N. A., Nikolaev A. V., Modification of the structure and properties of hard alloys of WC-Co system by high-current charged particle beams, *Vestnik Omskogo universiteta [Bulletin of Omsk University]*, 1996, vol. 2, pp. 39–43. (In Russ.)
14. Markov A. B., Mikov A. V., Ozur G. E., Padej A. G., *Instruments and experimental techniques*, 2011, vol. 54, no. 6, pp. 862–866. <https://doi.org/10.1134/S0020441211050149>
15. Kozochkin M. P., *Journal of Friction and Wear*, 2017, vol. 38, no. 4, pp. 333–337. <https://doi.org/10.3103/S1068366617040067>

Статья поступила в редакцию 03.02.2022; одобрена после рецензирования 12.02.2022; принята к публикации 14.02.2022.  
The article was submitted 03.02.2022; approved after reviewing 12.02.2022; accepted for publication 14.02.2022.