



Получено: 9.02.2022 г. | Принято: 15.02.2022 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.1.20.27>

Научная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО АКТИВИРОВАНИЯ ДИФфуЗИИ И ДЕСОРБЦИИ В ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРАХ

И.Ф.Ханбеков¹, аспирант, ORCID: 0000-0002-8381-6579

В.П.Михайлов¹, д.т.н, проф., ORCID: 0000-0003-3638-7932 / mikhailov@bmstu.ru

Аннотация: Представлены результаты исследования десорбции газа с внутренних поверхностей и диффузии из толщ деталей сверхвысокочастотных электровакуумных приборов за счет одновременного термического и ультразвукового воздействия на корпус прибора. Приведены сравнения парциальных и общих давлений при различных условиях откачки. Дано физическое объяснение механизма ультразвукового активирования процессов диффузии и десорбции газовых компонентов в вакууме.

Ключевые слова: Сверхвысокочастотный электровакуумный прибор, десорбция, диффузия, термическое воздействие, ультразвуковое активирование, парциальное давление, откачка

Для цитирования: И.Ф.Ханбеков, В.П.Михайлов. Исследование процессов ультразвукового активирования диффузии и десорбции в электровакуумных приборах. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 1. С. 20–27. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.1.20.27>

Received: 9.02.2022 | Accepted: 15.02.2022 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.1.20.27>

Original paper

RESEARCH OF THE ULTRASONIC ACTIVATION PROCESSES OF DIFFUSION AND DESORPTION IN ELECTROVACUUM DEVICES

I.F.Khanbekov¹, Post-graduate, ORCID: 0000-0002-8381-6579

V.P.Mikhailov¹, Doct. of Sci.(Tech), Prof., ORCID: 0000-0003-3638-7932 / mikhailov@bmstu.ru

Abstract. The results of the study of gas desorption from the internal surfaces and diffusion from the thickness of the parts of microwave electric vacuum devices resulting from simultaneous thermal and ultrasonic effects on the device body are presented. Comparisons of partial and total pressures under different conditions of pumping are given. The physical explanation of the ultrasonic activation mechanism of the processes of diffusion and desorption of gas components in vacuum is presented.

Keywords: Microwave electrovacuum device, desorption, diffusion, thermal action, ultrasonic activation, partial pressure, pumping-out

For citation: I.F.Khanbekov, V.P.Mikhailov. Research of the ultrasonic activation processes of diffusion and desorption in electrovacuum devices. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 1. PP. 20–27. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.1.20.27>

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия / Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia



ВВЕДЕНИЕ

Термовакuumная обработка некоторых видов электровакуумных приборов (ЭВП), например СВЧ-диапазона, является длительным и энергозатратным технологическим процессом. Откачка СВЧ ЭВП происходит по классической схеме, с использованием ступенчатого нагрева корпуса изделия и выдержки при температуре порядка 550°C. Продолжительность такого процесса может достигать нескольких десятков часов и определяется длительностью процессов диффузии и десорбции газа. Очевидно, что ускорить термовакuumную обработку ЭВП, придерживаясь классической технологии, невозможно ввиду того, что возможности термодиффузии и термодесорбции в данном случае исчерпаны, и дальнейшее повышение температуры приведет к повреждению или разрушению элементов СВЧ ЭВП. Более эффективным способом ускорения процесса удаления растворенных газов является использование наряду с нагревом нетермических видов активирования диффузии и десорбции, что позволяет интенсифицировать газовыделение и откачку [1]. Одним из способов ускорения диффузии и десорбции является ультразвуковое (УЗ) активирование [2]. Этот метод прост в реализации, экономичен и позволяет существенно повысить качество обезгаживания и сократить время термовакuumной обработки приборов.

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ

Оснастка для УЗ-активирования процессов диффузии и десорбции в технологии откачки СВЧ ЭВП предназначена для передачи УЗ-волн, создаваемых пьезоэлектрическими преобразователями, материалу деталей откачиваемого прибора. Если пьезопластину, воспринимающую энергию модулятора колебаний привести в механический контакт с корпусом нагретого ЭВП, то во всех частях конструкции одновременно будут возбуждаться УЗ упругие механические колебания с той же частотой, которую испытывает пьезопластина.

На рис.1 показана схема крепления оснастки для УЗ-обработки ЭВП. Откачка осуществляется следующим образом. Корпус ЭВП 1 оснащается двумя концентраторами 2,3 УЗ-излучателей, двумя одинаковыми пластинами пьезокристалла 5, закрепленными прижимными шайбами 4. Эти пластины 5 выполняют разные функции в режиме определения частоты максимального прохождения УЗ-волн и в режиме откачки. При определении частоты

INTRODUCTION

Thermo-vacuum processing of some types of electro-vacuum devices (EVDs), e.g. of the microwave range, is a long and energy-consuming technological process. The evacuation of microwave EVDs follows the classical scheme with the use of a step-by-step heating of the product body and holding at a temperature of about 550 °C. The duration of such process can reach several tens of hours and is determined by duration of gas diffusion and desorption processes. Obviously, it is impossible to accelerate thermovacuum treatment of EVD, adhering to the classical technology due to the fact that the possibilities of thermodiffusion and thermodesorption in this case are exhausted, and further temperature increase will lead to damage or destruction of the EVD microwave elements. A more effective way to accelerate removal of dissolved gases is to use, in parallel with heating, the non-thermal types of activation of diffusion and desorption, which allows to increase the gas extraction and pumping out [1]. One way to accelerate diffusion and desorption is ultrasonic (US) activation [2]. This method is easy to implement, cost-effective and can significantly improve the quality of degassing and reduce the time of thermo-vacuum treatment of devices.

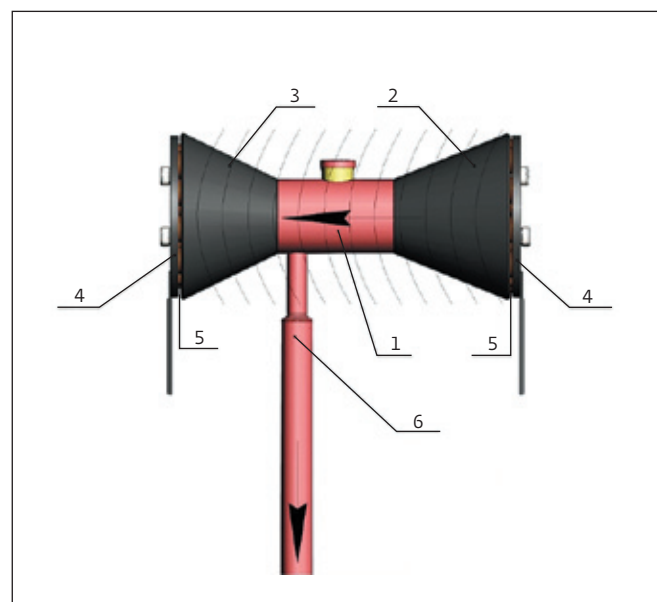


Рис.1. Схема крепления оснастки для УЗ-обработки ЭВП: 1 – ЭВП; 2, 3 – концентраторы УЗ-излучателей; 4 – прижимные шайбы; 5 – пластины пьезокристалла; 6 – штенгельная трубка откачки

Fig.1. Diagram of mounting of the equipment for EVD ultrasonic treatment: 1 – EVD; 2, 3 – concentrators of ultrasonic emitters; 4 – clamping washers; 5 – piezocrystal plates; 6 – tubulation pumping



максимального прохождения УЗ-волн через ЭВП одна пластина с помощью генератора сигналов генерирует колебания, амплитуду которых определяют на осциллографе, другая пластина осуществляет прием прошедших через ЭВП УЗ-колебаний, амплитуда которых также регистрируется на осциллографе. В режиме откачки ЭВП через штенгельную трубку 6 обе пластины 5 подключают к генератору сигналов по параллельной схеме для создания генерации на частоте максимального прохождения УЗ-волн через ЭВП. Для обеспечения устойчивой работы элементы изготавливают из монокристаллов семейства лангасита, сохраняющих свои пьезоэлектрические свойства до температуры 1400 °С. Электропитание к пластинам 5 подают от генератора сигналов через вакуум-плотные токовые вводы на фланце откачного поста. На рис.2 показана оснастка для изучения скорости диффузионных и десорбционных процессов из меди М0Б. Оснастка содержит штенгельную трубку 1 из меди М0Б, прижимные пластинки 2, активный пьезоэлемент 3 и керамические изоляторы 4, 5.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИФфуЗИИ И ДЕСОРБЦИИ

Механизм УЗ-активирования процессов диффузии и десорбции газовых компонентов из деталей СВЧ ЭВП достаточно сложен и состоит из нескольких одновременно происходящих процессов, которые способствуют ускорению диффузии, десорбции и вакуумной откачки газовых компонентов из корпуса прибора. Увеличение интенсивности термодесорбции с использованием УЗ-колебаний происходит в первую очередь из-за стимулирования отделения коллоидных частиц от поверхностей внутри вакуумного объема за счет их механического ускорения. Значительное количество коллоидных частиц находится на всех компонентах внутренней арматуры ЭВП. Они не только замедляют процесс газовой выделенности, закрывая поверхность деталей, но и сами являются источниками потоков газа. Еще одним механизмом интенсификации диффузии и десорбции газовых компонентов являются сжатие и растяжение кристаллической решетки металла и деформация межкристаллитных границ, вызванные УЗ-колебаниями структуры поликристаллического металла. Рассмотрим механизм выделения газообразного водорода из поверхностного слоя поликристаллической структуры металла при воздействии УЗ-колебаний [3-7]. Размеры кристаллитов находятся в довольно широком

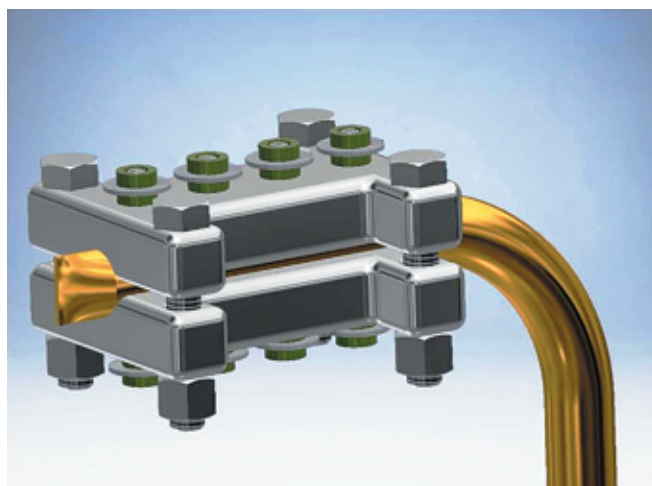


Рис.2. Оснастка для изучения скорости десорбционных процессов из материалов ЭВП: 1 – штенгельная трубка из меди М0Б; 2 – прижимные пластинки; 3 – активный пьезоэлемент; 4, 5 – керамические изоляторы

Fig.2. Equipment for the study of desorption rates of EVD materials: 1 – tubulation of M0B copper; 2 – clamping plates; 3 – active piezoelectric element; 4, 5 – ceramic insulators

TEST BENCH FOR ULTRASONIC TREATMENT OF ELECTROVACUUM DEVICES

Equipment for ultrasonic activation of diffusion and desorption processes in the technology of pumping out of microwave EVD is designed to transfer ultrasonic waves generated by piezoelectric transducers to the material of parts of the pumped device. If the piezoelectric plate, which receives the energy of the vibration modulator, is brought into mechanical contact with the body of heated EVD, then in all parts of the structure at the same time will be excited ultrasonic mechanical vibrations with the same frequency, which is experienced by the piezoelectric plate.

Figure 1 shows the mounting scheme for the ultrasonic treatment of the EVD. The pumping-out is carried out as follows. The EVD body 1 is equipped with two concentrators 2, 3 of ultrasonic emitters, two identical piezocrystal plates 5, fixed by pressure washers 4. These plates 5 have different functions in mode of maximum ultrasonic wave transit frequency determination and in mode of pumping out. When determining the frequency of maximum passage of ultrasonic waves through the EVD, one plate generates oscillation under the influence of the signal generator, the amplitude of such oscillations is determined with the aid of an oscillographer, and the other plate receives ultrasonic vibrations passed through the EVD, their amplitude is also recorded on an oscilloscope. In the mode



диапазоне от единиц до десятков микрометров, ширина межзеренных границ – от единиц до десятков ангстрем. Именно в этих межзеренных границах в основном находится газ, сорбированный на поверхности кристаллитов и растворенный в объеме металла [8-10]. Под воздействием УЗ-волн в кристаллитах возникают вынужденные упругие колебания. В этом случае ширина межкристаллических границ также изменяется с частотой вынужденных колебаний. При определенных условиях происходит резкое резонансное увеличение амплитуды упругих деформаций границ между кристаллитами. При этом снижаются силы взаимодействия атомов растворенного газа с атомами металла. Газ по межзеренным границам с большей скоростью диффундирует на поверхность, соприкасающуюся с вакуумной средой, затем десорбирует и откачивается вакуумной системой. Еще одним механизмом, интенсифицирующим диффузию газовых компонентов, является передача дополнительной энергии УЗ-колебаний кристаллической решетке металла и ускорение диффузии газа внутри кристаллитов.

Удельный поток газа q_i по толщине металла ограничен диффузионным процессом, который в данном случае описывается вторым законом Фика:

$$q_i = \frac{8dN_v}{\pi^2} \left(1 - e^{-\frac{D\pi^2}{4d^2}t}\right), \quad (1)$$

где d – половина толщины металлической детали, N_v – начальная молекулярная концентрация газа в металле, D – коэффициент диффузии газа в металле.

Коэффициент диффузии газа в металле определяется следующим образом:

$$D = \frac{1}{6} a \cdot u \cdot e^{-\frac{E_{\text{диф}}}{RT}}, \quad (2)$$

где a – постоянная кристаллической решетки металла, u – средняя тепловая скорость атомов, $E_{\text{диф}}$ – энергия активации диффузии газа.

Энергия активации E диффузии газа уменьшается за счет воздействия УЗ-волн на поликристаллическую структуру металла и ослабления сил взаимодействия атомов растворенного газа с атомами металла.

Время пребывания молекулы (атома) газа на поверхности металла:

$$\tau_{\text{пр}} = \tau_0 e^{\frac{E_{\text{дес}}}{RT}}, \quad (3)$$

of pumping-out of EVD through the tubulation 6 both plates 5 are connected to the signal generator in a parallel circuit to create a generation at the frequency of maximum passage of ultrasonic waves through the EVD. To ensure stable operation, the elements are made of Langasite family monocrystals, which retain their piezoelectric properties up to a temperature of 1400 °C. Power to the plates 5 is supplied from a signal generator through vacuum-tight current inputs on the flange of the pumping station. Figure 2 shows a rigging for studying diffusion and desorption rates from M0B copper. The toolkit includes tubulation 1 of M0B copper, clamping plates 2, active piezoelectric element 3 and ceramic insulators 4, 5.

STUDY OF DIFFUSION AND DESORPTION PROCESSES

The mechanism of ultrasonic activation of diffusion and desorption processes of gas components from microwave EVD parts is rather complicated and consists of several simultaneously occurring processes, which contribute to acceleration of diffusion, desorption and vacuum evacuation of gas components from the device body. An increase in the intensity of thermodesorption using ultrasonic vibrations occurs primarily by stimulating separation of colloidal particles from the surfaces within the vacuum volume by their mechanical acceleration. Significant quantities of colloidal particles are found on all components of the internal fittings of EVDs. Not only do they slow down the gassing process by covering the surface of the components, but they themselves are also sources of gas flow. Another mechanism for intensification of diffusion and desorption of gas components is compression and stretching of the metal lattice and deformation of intercrystalline boundaries caused by ultrasonic vibrations of polycrystalline metal structure. Let us consider the mechanism of hydrogen gas release from the surface layer of polycrystalline metal structure under the influence of ultrasonic vibrations [3-7]. Crystallite sizes are in a fairly wide range from units to tens of micrometers, the width of intergranular boundaries – from units to tens of angstroms. It is in these intergranular boundaries that the gas sorbed on the crystallite surface and dissolved in the metal volume is mainly found [8-10]. Under the influence of ultrasonic waves, forced elastic oscillations are generated in crystallites. In this case the width of the intercrystalline boundaries also changes with the frequency of the forced oscillations. Under certain conditions a sharp resonance increase in the amplitude of the elastic deformation of the boundaries between the crystallites occurs. In this case, the interaction forces of atoms of dissolved gas with atoms of

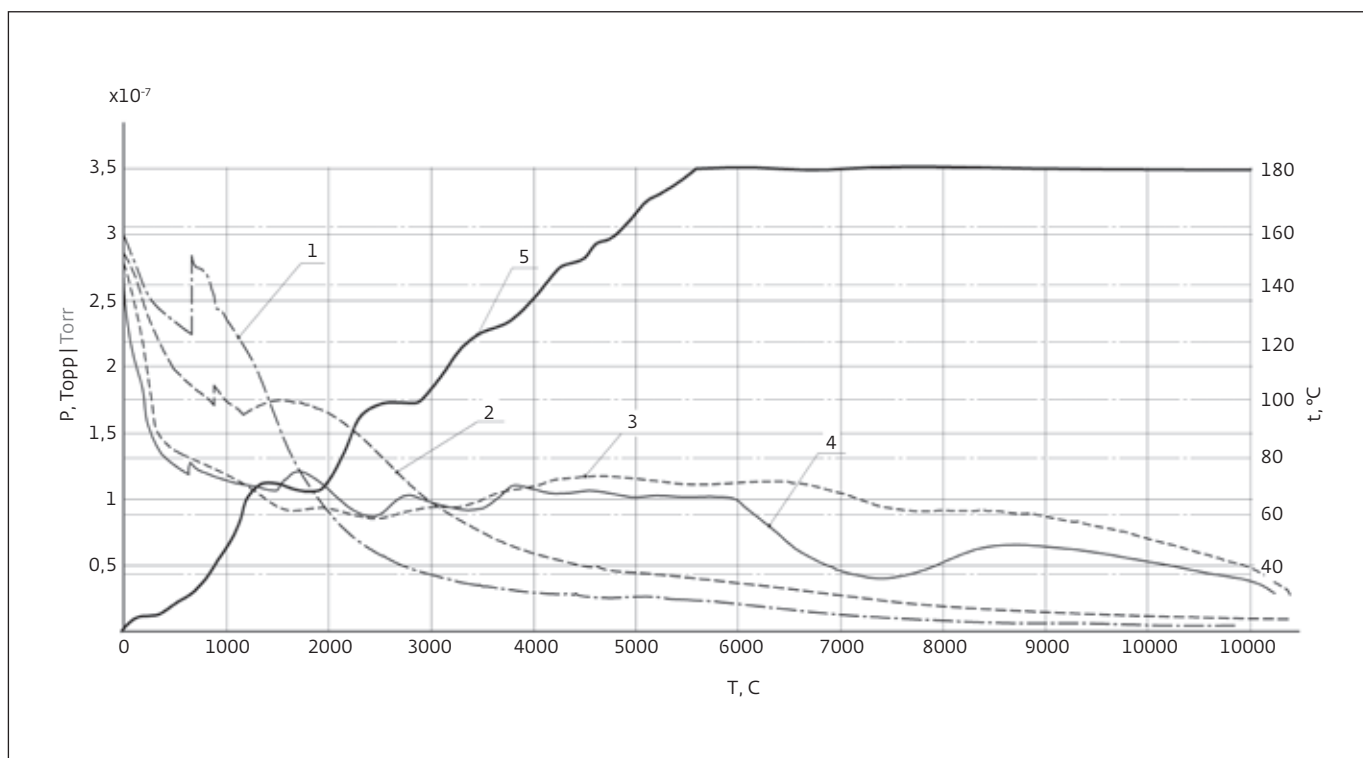


Рис.3. Временная зависимость изменения парциального давления и температуры газа при различных частотах УЗ-колебаний для 1 а.е.м. (1 – без УЗ; 2 – 100 кГц; 3 – 300 кГц; 4 – 55 кГц; 5 – температура)

Fig.3. Temporal dependence of gas partial pressure and temperature changes at different frequencies of ultrasonic vibrations for 1 a.u.m. (1 – no US, 2 – 100 kHz, 3 – 300 kHz, 4 – 55 kHz, 5 – temperature)

где τ_0 – минимальное время пребывания молекулы (атома) газа на поверхности, определяемое периодом теплового колебания молекул $\tau_0 \sim 10^{-13}$ с, $E_{\text{дес}}$ – энергия десорбции.

Скорость десорбции, то есть количество молекул (атомов) газа, десорбирующих в единицу времени с единицы поверхности, может быть определена как:

$$N_{\text{дес}} = \frac{N'_{\text{пов}}}{\tau_{\text{пр}}} = \frac{N'_{\text{пов}}}{\tau_0} e^{-\frac{E_{\text{дес}}}{RT}}, \quad (4)$$

где $N'_{\text{пов}}$ – общее число адсорбированных молекул (атомов) газа на единицу поверхности.

Энергия $E_{\text{дес}}$ десорбции газа уменьшается за счет воздействия УЗ-волн на поверхность металла и ослабления сил взаимодействия молекул (атомов) сорбированного газа с атомами металла.

Экспериментально доказана эффективность процесса активирования УЗ-колебаниями диффузии и десорбции. Суть экспериментов заключалась в регистрации повышения давления газовых компонентов в процессе откачки

metal decrease. The gas at intergranular boundaries diffuses to the surface in contact with the vacuum medium at higher speed, then it is desorbed and evacuated by the vacuum system. Another mechanism intensifying the diffusion of gas components is the transfer of additional energy of ultrasonic vibrations to the crystal lattice of the metal and acceleration of gas diffusion within crystallites.

The specific gas flow q_i across the metal thickness is limited by the diffusion process, which in this case is described by Fick's second law:

$$q_i = \frac{8dN_v}{\pi^2} (1 - e^{-\frac{D\pi^2}{4d^2}t}), \quad (1)$$

where d – one half of the metal part, N_v – initial molecular concentration of gas in a metal, D – diffusion coefficient of gas in a metal.

The gas diffusion coefficient in a metal is determined as follows:

$$D = \frac{1}{6} a \cdot u \cdot e^{-\frac{E_{\text{диф}}}{RT}}, \quad (2)$$

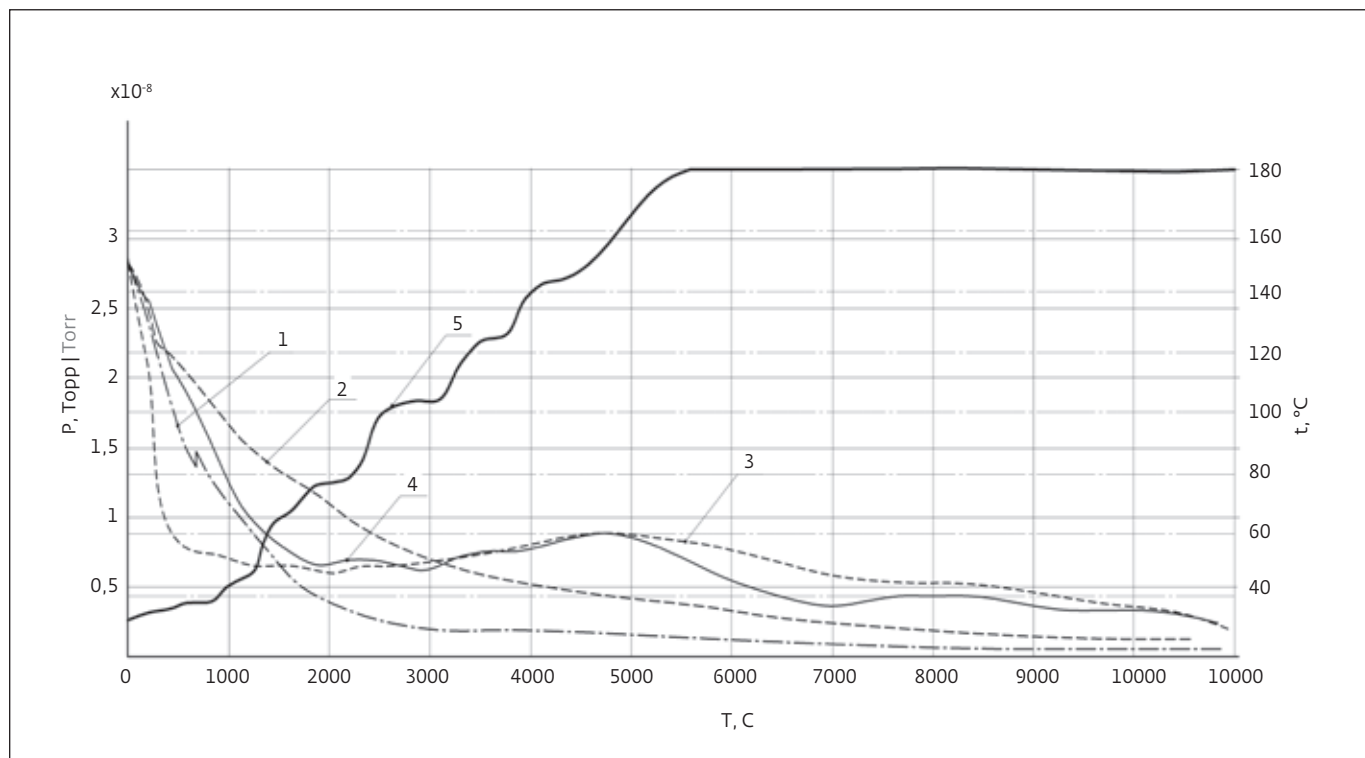


Рис.4. Временная зависимость изменения парциального давления и температуры газа при различных частотах УЗ-колебаний для 32 а.е.м. (1 – без УЗ; 2 – 100 кГц; 3 – 300 кГц; 4 – 55 кГц; 5 – температура)
 Fig.4. Temporal dependence of gas partial pressure and temperature changes at different frequencies of ultrasonic vibrations for 32 a.u.m. (1 – no US, 2 – 100 kHz, 3 – 300 kHz, 4 – 55 kHz, 5 – temperature)

объема штенгеля из меди М0Б. Во всех экспериментах штенгель нагревался со скоростью примерно 2 °С/мин в диапазоне 20÷180 °С. На рис.3 показана временная зависимость изменения парциального давления и температуры атомарного водорода (1 а.е.м) при различных частотах УЗ-колебаний. Из графиков видно, что уже при температуре более 100 °С парциальное давление атомарного водорода при одновременном воздействии УЗ-колебаний разной частоты и температуры больше, чем без УЗ-воздействия. При этом возрастают скорости диффузии и десорбции газа за счет УЗ-активирования.

На рис.4 показана временная зависимость изменения парциального давления и температуры молекулярного кислорода (32 а.е.м) при различных частотах УЗ-колебаний. Из графиков видно, что при температуре более 80 °С парциальное давление молекулярного кислорода при одновременном воздействии УЗ-колебаний разной частоты и температуры больше, чем без УЗ-воздействия. При этом возрастают скорости диффузии и десорбции газа за счет УЗ-активирования.

where a – lattice constant of the metal, u – the average thermal speed of the atoms, $E_{\text{диф}}$ – activation energy of gas diffusion.

The activation energy $E_{\text{дес}}$ of gas diffusion decreases due to the effect of ultrasonic waves on the polycrystalline structure of the metal and the weakening of the interaction forces of the dissolved gas atoms with the metal atoms.

The dwelling time of a gas molecule (atom) on a metal surface is:

$$\tau_{\text{пр}} = \tau_0 e^{\frac{E_{\text{дес}}}{RT}}, \quad (3)$$

where τ_0 is the minimum dwelling time of a gas molecule (atom) on the surface, determined by the period of thermal oscillation of molecules $\tau_0 \sim 10^{-13}$ s, $E_{\text{дес}}$ is the desorption energy.

The desorption rate, i.e. the number of molecules (atoms) of gas desorbing per unit time from a surface unit, can be determined as follows:

$$N_{\text{дес}} = \frac{N'_{\text{пов}}}{\tau_{\text{пр}}} = \frac{N'_{\text{пов}}}{\tau_0} e^{-\frac{E_{\text{дес}}}{RT}}, \quad (4)$$

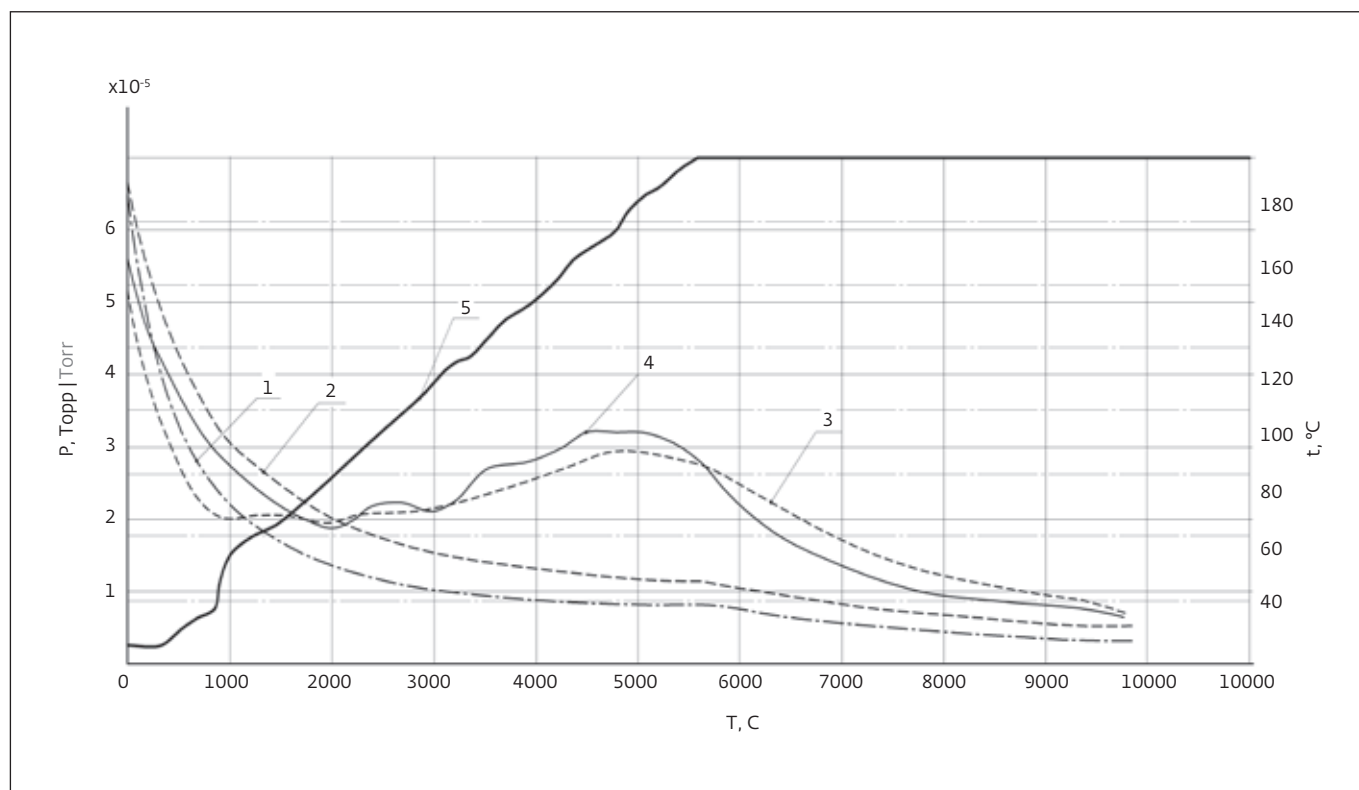


Рис.5. Временная зависимость изменения суммарного давления и температуры газа при различных частотах УЗ-колебаний (1 – без УЗ; 2 – 100 кГц; 3 – 300 кГц; 4 – 55 кГц; 5 – температура)

Fig.5. Temporal dependence of changes in total gas pressure and temperature at different ultrasonic frequencies (1 – no US, 2 – 100 kHz, 3 – 300 kHz, 4 – 55 kHz, 5 – temperature)

На рис.5 показана временная зависимость изменения суммарного давления и температуры газа при различных частотах УЗ-колебаний. Из графиков видно, что при температуре более 60 °С суммарное давление при одновременном воздействии УЗ-колебаний разной частоты и температуры больше, чем без УЗ-воздействия. При нагреве до 160 °С с одновременным включением УЗ-колебаний с частотой 55 и 300 кГц наблюдается ярко выраженный максимум суммарного давления (рис.5) и выброса газовых компонентов, в отличие от использования классической технологии обезгаживания с термической обработкой.

ВЫВОДЫ

УЗ-активирование процессов диффузии и десорбции газов совместно с нагревом позволяет повысить интенсивность десорбции газовых компонентов и диффузии из внутренних элементов обрабатываемого изделия, сократить продолжительность времени обезгаживания ЭВП и, следовательно, увеличить

where $N'_{\text{пов}}$ is the total number of gas molecules (atoms) adsorbed per surface unit.

The energy $Q_{\text{дес}}$ of gas desorption is reduced by the effect of ultrasonic waves on the metal surface and the weakening of the interaction forces between molecules (atoms) of sorbed gas and metal atoms.

The effectiveness of the ultrasonic vibration activation process of diffusion and desorption was experimentally proved. The essence of the experiments was to record the increase in pressure of gas components in the process of pumping out the volume of tubulation of MOB copper. In all experiments the tubulation was heated at a rate of about 2 °C/min in the range of 20÷180 °C. In Fig.3 the temporal dependence of changes in partial pressure and temperature of atomic hydrogen (1 a.u.m.) at different frequencies of ultrasonic vibrations is shown. The graphs show that already at temperatures above 100 °C the partial pressure of atomic hydrogen at simultaneous exposure to ultrasonic vibrations of different frequency and temperature is greater than without



объемы выпуска готовой продукции. В процессе откачки при нагреве прибора с одновременным воздействием УЗ-колебаний наблюдается ярко выраженный максимум суммарного давления и газовыделения, связанный с уменьшением сил взаимодействия молекул и атомов газа с материалами вакуумной арматуры прибора.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Ostroumov G.A., Fedotov G.A. 1973. Acoustic journal. Vol. 1. P. 76-9.
2. Lee I.P., Lifanov N.D., Petrov V.S., Hanbekov I.F., Kotlicki I.Yu., Alenkov I., Zabelin A.N., Sugars A. 2018. Patent RU 2 644 553.
3. Krestnikovskiy K.V., Panovko G.Ya., Shokhin A.E. 2016. Vibroengineering Procedia. 8, pp. 208-212.
4. Kudryashov B.A., Grib V.V., Gaevskii V.V., Dem'yanushko I.V., Kartsov S.K. 2017. Russian Engineering Research. V. 12. 33. 1081-3.
5. Dem'yanushko I.V., Kazantsev V.F., Karagodin V.I., Luzhnov Y.M., Prikhod'ko V.M. 2017. Russian Engineering Research. Vol. 12. PP. 1084-6.
6. Khanbekov I.F., Petrov V.S., Li I.P., Polunina A.A., Loktev D.N. Inorganic Materials: Applied Research, 2021, Vol. 12, no. 3, 680-685.
7. Vlasova D.V., Plokhikh A.I., Semenov M.Y., Polyanskii V.M., Safonov M.D. 2018 Metallurgist 62(5-6), pp. 432-439.
8. Kurkin A.S., Makarov E.L., Kurkin A.B., Rubtsov D.E., Rubtsov M.E. 2017. Metal Science and Heat Treatment. Vol. 3-4. PP. 250-4.
9. Emelianenko R.O., Deulin E.A. New method of ultra low gas flow control. Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1313(1). P. 012017.
10. Gavriushin S.S., Poliakov V.B., Prokhorov E.P., Deulin E.A. Physical basis of the device for surface cleanliness measurement. Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 872(1). P. 012051.

Декларация о конфликте интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

the ultrasonic vibrations. At the same time, the diffusion and desorption rates of gas increase due to ultrasonic activation.

Figure 4 shows the temporal dependence of changes in partial pressure and temperature of molecular oxygen (32 a.u.m.) at different frequencies of ultrasonic vibrations. From the graphs it can be seen that at temperatures above 80 °C the partial pressure of molecular oxygen at simultaneous exposure to ultrasonic vibrations of different frequency and temperature is greater than without ultrasonic vibrations. At the same time, gas diffusion and desorption rates increase due to ultrasonic activation.

In Fig.5 the temporal dependence of changes in total pressure and gas temperature at different frequencies of ultrasonic vibrations is shown. The graphs show that at temperatures above 60 °C the total pressure at simultaneous exposure to ultrasonic vibrations of different frequencies and temperatures is greater than without ultrasonic vibrations. When heated to 160 °C with the simultaneous activation of ultrasonic vibrations with a frequency of 55 and 300 kHz, a pronounced maximum of the total pressure (Fig.5) and the release of gas components, in contrast to the use of classical technology with degassing thermal treatment.

CONCLUSIONS

Ultrasonic activation of gas diffusion and desorption processes accompanied with heating allows of increasing the intensity of gas components desorption and diffusion from the internal elements of the processed product, reduces duration of degassing of EVD and, therefore, increases the output of finished products. In the process of evacuation, while heating the device, with simultaneous influence of ultrasonic vibrations, a pronounced maximum of total pressure and gas release is observed as it is connected with decrease of the interaction forces between gas molecules and atoms with the materials of the device vacuum fittings.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.