

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО АКТИВИРОВАНИЯ ДИФФУЗИИ И ДЕСОРБЦИИ В ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРАХ

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

И.Ф.Ханбеков, / ivan.khan@ya.ru

В.П.Михайлов / mikhailov@bmstu.ru

I.F.Khanbekov, V.P.Mikhailov

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва

Представлены результаты исследования десорбции газа с внутренних поверхностей и диффузии из толщи 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.

The results of the study of gas desorption from the internal surfaces and diffusion from the thickness of the parts of microwave electro-vacuum devices due to 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 mechanism of ultrasonic activation of the diffusion processes and desorption of gas components in vacuum is given.

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

Key words: microwave electro-vacuum device, desorption, diffusion, thermal action, ultrasonic activation, partial pressure, pumping.

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 растворённых 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, закреплёнными прижимными шайбами 4. Эти пластины 5 выполняют разные функции в режиме определения частоты максимального прохождения УЗ волн и в режиме откачки. При определении частоты 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; керамические изоляторы 4,5.

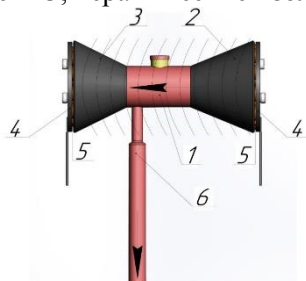


Рис. 1. Схема крепления оснастки для УЗ обработки ЭВП: 1 – ЭВП; 2,3 – концентраторы УЗ излучателей; 4 – прижимные шайбы; 5 – пластины пьезокристалла; 6 – штенгельная трубка откачки

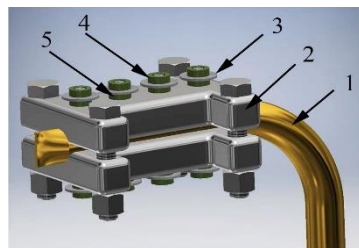


Рис. 2. Оснастка для изучения скорости десорбционных процессов из материалов ЭВП: 1 – штенгельная трубка из меди М0Б; 2 – прижимные пластинки; 3 – активный пьезоэлемент; 4,5 – керамические изоляторы

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. Ещё одним механизмом интенсификации диффузии и десорбции газовых компонентов являются сжатие и растяжение кристаллической решетки металла и деформация межкусталлитных 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 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 межкусталлических 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. Ещё 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:

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

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:

$$D = \frac{1}{6} a \cdot u \cdot e^{-\frac{E_{diff}}{RT}},$$

где a – постоянная кристаллической решетки металла; u – средняя тепловая скорость атомов; E_{diff} – энергия активации диффузии газа.

Энергия активации E диффузии газа уменьшается за счёт 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:

$$\tau_{np} = \tau_0 e^{\frac{E_{des}}{RT}},$$

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

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

$$N_{des} = \frac{N'_{nos}}{\tau_{np}} = \frac{N'_{nos}}{\tau_0} e^{-\frac{E_{des}}{RT}},$$

где N'_{nos} – общее число адсорбированных молекул (атомов) газа на единицу поверхности.

Энергия Q_{des} десорбции газа уменьшается за счёт 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 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.

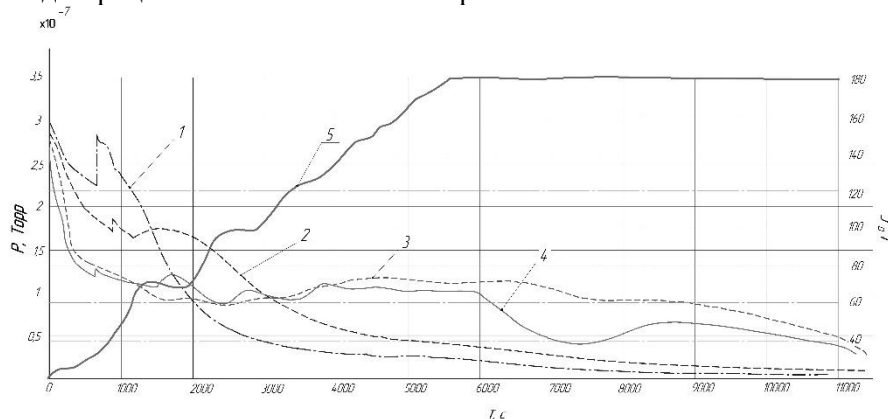


Рис. 3. Временная зависимость изменения парциального давления и температуры газа при различных частотах УЗ колебаний для 1 а.е.м. (1 – без УЗ; 2 – 100 кГц; 3 – 300 кГц; 4 – 55 кГц; 5 - температура).

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.

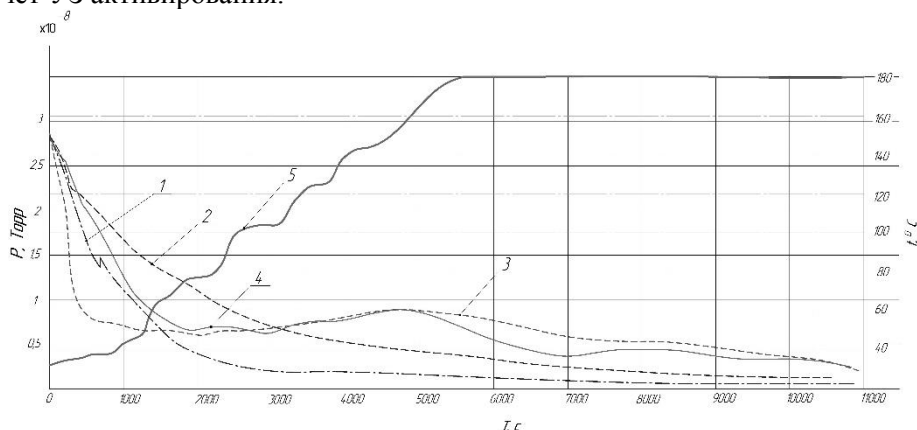


Рис. 4. Временная зависимость изменения парциального давления и температуры газа при различных частотах УЗ колебаний для 32 а.е.м. (1 – без УЗ; 2 – 100 кГц; 3 – 300 кГц; 4 – 55 кГц; 5 - температура).

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.

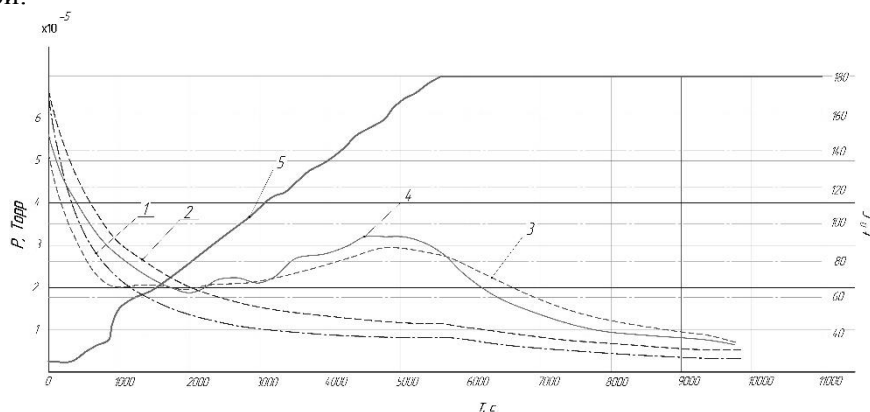


Рис. 5. Временная зависимость изменения суммарного давления и температуры газа при различных частотах УЗ колебаний (1 – без УЗ; 2 – 100 кГц; 3 – 300 кГц; 4 – 55 кГц; 5 - температура).

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 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ostroumov G A and Fedotov G A 1973 Acoustic journal 1 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 12 1081–3
5. Dem'yanushko I V, Kazantsev V F, Karagodin V I, Luzhnov Y M, Prikhod'ko V M 2017 Russian Engineering Research 12 1084–6
6. I. F. Khanbekov, V. S. Petrov, I. P. Li, A. A. Polunina, and D. N. Loktev. 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), 432-439
8. Kurkin A S, Makarov E L, Kurkin A B, Rubtsov D E and Rubtsov M E 2017 Metal Science and Heat Treatment 3–4 250–4
9. Emelianenko R.O., Deulin E.A. New method of ultra low gas flow control. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1313(1), 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, 872(1), 012051