

Энергетические аспекты повышения надёжности герметизации сверхвысоковакуумных коммутационных устройств

А.Е. Вязовецкова, В.В. Вязовецков

*Москва, НИЦ «Курчатовский институт», пл. Курчатова, 1
E-mail: Vyazovetskova_AE@nrcki.ru , Vyazovetskov_VV@nrcki.ru*

Выявлены три основные типа деформационных схем прогреваемых сверхвысоковакуумных коммутационных устройств с устойчивым многократным воспроизведением условий герметизации. Приведено сравнение рекомендуемых деформационных схем с распространёнными схемами прогреваемых сверхвысоковакуумных разъёмных соединений. Настойчиво рекомендуется новый способ управления клапанами, повышающий надёжность их герметизации и ресурс уплотнителя.

Energy aspects of improving the sealing reliability of ultrahigh vacuum switching device. A.E.Vyazovetskova, V.V. Vyazovetskov. Three main types of deformation schemes of heated ultrahigh vacuum switching device with stable repeated reproduction of the sealing conditions were revealed. Comparison of the recommended deformation schemes with the widespread schemes of heated ultrahigh vacuum detachable connections is given. A new method of valve control is urgently recommended, which increases the reliability of its sealing and the life of the sealant.

Сверхвысоковакуумные прогреваемые коммутационные устройства являются наиболее многочисленными и наименее надёжными элементами. Обзоры разработок в лучшем случае дают деформационные схемы соединений с приведением зависимости величины натекания от прикладываемого удельного усилия (смотри, например, [1- 4]). Многочисленные подходы к анализу процессов герметизации не предоставляют обоснование выбора конкретных конструктивных решений.

В качестве предмета изучения авторами выбран процесс деформации уплотнителя. Силовая герметизация осуществляется заполнением уплотнителем канавок микронеровностей шероховатости герметизирующей поверхности. Одновременно с этим происходит процесс деформации всего уплотнителя, ведущий к изменению его формы и условий дальнейшего взаимодействия [5]. Задача выбора деформационной схемы сводится к отысканию из множества конструкций соединений такого решения, при котором в наибольшей степени реализуется требуемая герметичность разъёмного соединения в процессе эксплуатации.

Процесс герметизации зависят от сложно контролируемых, но очень важных факторов (механических свойств уплотнителя, состояния поверхностей, качества приложения и величины усилия герметизации, совмещении элементов, запылённости помещения). Близкие значения величины натекания могут наблюдаться для разных деформационных схем и условий эксплуатации. Поэтому для анализа деформационных схем использовались существенные признаки выполнения деформационной схемы. Изучение зависимости натекания от величины прикладываемых усилий, гистерезиса натекания, влияния цикличности срабатывания и прогревов для отдельных деформационных схем, а также вопросы выбора материала уплотнителя рассмотрены в статьях [5 – 10] и других работах авторов.

Большую полноту анализа предоставляет предлагаемая нами концепция «рационального процесса многократной герметизации» сверхвысоковакуумных разъёмных устройств, основанная на требованиях к показателям назначения в заданных условиях эксплуатации (отсутствие единственности решения) на каждой стадии работы (до срабатывания, в закрытом состоянии и последующем срабатывании). Главным критерием качества разъёмного соединения выбрана величина циклического натекания – Q_n . Важна минимизация влияния воздействующих параметров (усилия, числа циклов срабатываний, свойств уплотнителя, точности изготовления герметизирующих элементов и их совмещения, температуры, внешнего механического воздействия, «схватывания» поверхностей) на величину натекания через соединение.

Для предлагаемого подхода системное условие [9, 10]:

$$\begin{cases} Q_n = Q_1(a_0) + \frac{\partial Q(a)}{\partial a} \times \Delta a + \sum \frac{\partial Q(b_i)}{\partial b_i} \times \Delta b_i + \frac{\partial Q(n)}{\partial n} \times (n - 1) < kQ^* \\ \frac{\partial Q(a)}{\partial a} \rightarrow 0; \quad \frac{\partial Q(b_i)}{\partial b_i} \rightarrow 0; \quad \frac{\partial Q(n)}{\partial n} \rightarrow 0 \\ \Delta b_i \rightarrow 0; \Delta a \rightarrow 0 \end{cases} \quad (1)$$

где $Q_1(a_0)$, Q_n , Q^* - величины натекания в рабочем положении соответственно при первом и n цикле срабатывания и значение величины допускаемого натекания;

Величина допустимого натекания для фланцевых соединений должна быть минимальной ($Q^* = 10^{-12}$ м³Па/с и ниже). Для затворов, учитывая сложность воспроизведения многократного взаимодействия, эта величина больше ($Q^* = 10^{-10}$ м³ Па /с и более).

$\partial Q(a)/\partial a$, $\partial Q(b_i)/\partial b_i$, $\partial Q(n)/\partial n$ - средние значения частных производных потока натекания соответственно по управляющему параметру a , по воздействующим эксплуатационным параметрам b_i и задаваемому числу срабатываний n ;

i – текущий параметр соединения; $k < 1$ - коэффициент запаса ($0,5 > k > 0,1$).

Целью доклада является обоснование выбранных узлов герметизации посредством анализа энергетических процессов при многократной деформации герметизирующих элементов, влияния геометрии герметизирующих поверхностей на необходимую величину прикладываемого усилия и выбора способов передачи энергии на герметизирующие элементы внешним приводом.

Состояние герметизирующего контакта с множеством параметров, влияющих на герметичность контакта, описывалось понятием «комплекс» - \hat{K}_i . Условия достаточности надёжной эксплуатации сверхвысоковакуумного соединения в процессе многократного срабатывания запишем в виде системы:

$$\begin{cases} \hat{K}_{i-1} \xrightarrow{\Delta \Phi_i[(\Delta \bar{\varepsilon}_i, \Delta \bar{\sigma}_i, \Delta t_i, \Delta T_i), \Delta \bar{F}_i]} \hat{K}_i \\ Q\{\hat{K}_j\} \leq Q_{don} \\ Q\{\hat{K}_i\} - Q\{\hat{K}_{i+1}\} \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

где \hat{K}_i – комплекс i состояния герметизирующего контакта рассматриваемой деформационной схемы;

$Q\{\hat{K}_i\}$, Q_{don} – значение натекания в комплексе \hat{K}_i и величина допустимой течи;

$\Delta \Phi_i$ – изменение формы герметизирующего контакта в комплексе \hat{K}_i ;

$\Delta \bar{\varepsilon}_i$, $\Delta \bar{\sigma}_i$, $\Delta \bar{F}_i$ – изменение векторных величин деформации уплотнителя, напряжения и прикладываемого усилия;

Δt_i , ΔT_i – изменение времени и температуры при образовании комплекса \hat{K}_i ;

i, j – индексы текущих состояний комплекса контакта.

Первое математическое выражение в системе (2) формально описывает переход состояния герметизирующего контакта в рамках его деформационного взаимодействия с изменением формы, деформации герметизирующих поверхностей и релаксацией внутренних напряжений в герметизирующих элементах с учётом времени и заданных температур, продолжающегося воздействия усилия внешнего привода.

Второе неравенство показывает необходимость выбора типов таких контактов, которые способны обеспечить требуемую степень герметичности соединения.

Третье неравенство указывает, что в заданных условиях эксплуатации в последующих циклах срабатывания величина натекания не должна повышаться. Это условие не является необходимым требованием, однако оно даёт уверенность в надёжности эксплуатации соединения.

Рассмотрим возможности выполнения системы (2), считая причиной отказа снижение контактного напряжения между герметизирующими поверхностями вследствие ползучести

материала уплотнителя из зоны герметизации, а также изменение условий взаимодействия, вызванных изменением площади герметизирующего контакта и поводками герметизирующей поверхности.

Тривиальный случай выполнения системы (2) является термостатированная система с отсутствием внешних нагрузок на соединение. В этом случае получаем

$$\Delta T_i = 0, \Delta \bar{\varepsilon}_i = 0, \Delta \bar{\sigma}_i = 0, \Delta \bar{F}_i = 0, \Delta \Phi_i = 0, \text{ а следовательно } \hat{K}_i = \hat{K}_{i+1} \text{ и } Q\{\hat{K}_i\} = Q\{\hat{K}_{i+1}\}$$

В условиях высокотемпературного термоциклирования ($\Delta T_i = var, \Delta \bar{\sigma}_i = var$) для крупногабаритных соединений неизбежны деформации уплотнителя и твёрдой герметизирующей поверхности. Возможны варианты поведения комплекса \hat{K}_i :

1. Состояние комплекса \hat{K}_i с неустойчивой герметизацией

$$\Delta \bar{\varepsilon}_i > 0, \Delta \bar{F}_i \approx 0, \Delta \Phi_i > 0, \text{ следует } \hat{K}_i \neq \hat{K}_{i+1} \text{ и } Q\{\hat{K}_i\} \neq Q\{\hat{K}_{i+1}\}.$$

В этом случае возникает потребность в повышении прикладываемого усилия.

2. Состояние комплекса \hat{K}_i с устойчивой динамической герметизацией

$$\Delta \bar{\varepsilon}_i > 0, \Delta \bar{F}_i \approx 0, \Delta \Phi_i \approx 0, \text{ следует } \hat{K}_i \approx \hat{K}_{i+1} \text{ и } Q\{\hat{K}_i\} \approx Q\{\hat{K}_{i+1}\}.$$

Такое состояние комплекса \hat{K}_i соответствует рекомендуемая авторами деформационная схема с «волочением» уплотнителя для прогреваемых клапанов.

Схема со срезанием уплотнителя не принята для испытаний вследствие наличия острого выступа, провоцирующего дополнительную деформацию уплотнителя при прогревах. В работе [11, с.118] экспериментально установили наличие критического радиуса режущей кромки, ниже которого возможно образование схватывание поверхностей. Схема с «волочением» уплотнителя лишена этого недостатка, большой угол наклона герметизирующей поверхности позволяет получать высокую герметичность и широкую площадку гистерезиса натекания [5].

Канавочно-клиновые соединения с одинаковым углом наклона зуба и канавки, равным девяносто градусов, не позволили получить высокую степень герметичности [12]. Только со снижением угла наклона образующих поверхностей канавки до шестидесяти градусов появились локальные зоны с повышенным напряжением сжатия уплотнителя, обеспечивающие требуемую герметичность соединения.

3. Состояние комплекса \hat{K}_i с устойчивой статической герметизацией

$$\Delta \bar{\varepsilon}_i \approx 0, \Delta \bar{F}_i \approx 0, \Delta \Phi_i \approx 0, \text{ следует } \hat{K}_i \approx \hat{K}_{i+1} \text{ и } Q\{\hat{K}_i\} \approx Q\{\hat{K}_{i+1}\}.$$

Для упругого уплотнителя такое схемное решение очевидно. Деформационная схема имеет самое широкое использование во фланцевых соединениях и в затворах вследствие высокой надёжности герметизации. Авторы также рекомендуют данную схему для прогреваемых крупногабаритных сверхвысоковакуумных затворов, при этом надо снижать поток газовой выделений из уплотнителя в перекрываемую магистраль.

Применительно к пластичному уплотнителю сделаем уточняющее замечание. Условием отсутствия текучести пластичного материала для элементарного участка является неравенство:

$$(\sigma_{\max} + \Delta \sigma_{\max}) - (\sigma_{\min} + \Delta \sigma_{\min}) \leq \beta \sigma_s, \tag{3}$$

где $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ – первоначальное значение максимального и минимального значения напряжений в элементарной прямоугольной ячейке;

$\Delta \sigma_{\max}, \Delta \sigma_{\min}$ – величина изменения напряжений;

σ_s – предел текучести материала уплотнителя;

β – коэффициент, зависящий от величины среднего напряжения ($1 \leq \beta \leq 2/\sqrt{3}$)

В соответствии с неравенством (3) перемещение в зоне герметизации не произойдёт, если близлежащий участок находится под напряжением, сравнительно близким по значению с наибольшим напряжением. Зона застоя создаётся в рекомендуемых нами модернизированных канавочно-клиновых фланцевых соединениях.

Деформация тонкой плёнки уплотнителя требует повышенных напряжений, однако схема чувствительна к отклонению от правильной геометрической формы твёрдых поверхностей герметизирующих элементов. Возникающие при термоциклировании поводки (микроробления) твёрдых герметизирующих элементов приводят к резкому возрастанию натекания [8, 13].

При наличии внешнего силового воздействия сохранение герметичности контакта возможно при малости его усилия по сравнению с прикладываемым усилием герметизации и наличии широкого плато на графике зависимости натекания от прикладываемого усилия. В связи с этим повышенные усилия герметизации не являются большим недостатком. Д.Б.Зворыкин в фланцевых соединениях увеличивал прикладываемые усилия после достижения максимальной герметичности [12].

Выбранные схемы для фланцевых и клапанных соединений показали высокую степень герметизации в испытаниях при комнатной температуре. Канавочно-клиновые фланцевые соединения успешно эксплуатируются десятилетиями. Затворы типа ЗПТ с эластомерным уплотнителем также доказали свою надёжность. Воспроизводимость условий герметизации в деформационной схеме с «волочением» уплотнителя для клапанов позволяет надеяться на благоприятный исход термических испытаний.

Сравнение выбранных деформационных схем с некоторыми известными схемами по изучаемым показателям приведено в прилагаемой таблице.

Таблица. Сравнительные характеристики основных деформационных схем сверхвысоковакуумных коммутационных устройств.

Показатели качества деформационной схемы	Тип деформационной схемы							Эластичные плёночные элементы
	Сминание уплотнителя	Внедрение выступа		Канавочно-клиновая	Упругость герметизирующего элемента			
		CF	Волочение		Helicoflex	Vatring	Эластомер	
<u>Показатели назначения:</u> - локализация зоны герметизации - устойчивость зоны герметизации - гистерезис натекания - температурный интервал - влияние пыли на герметичность	-	-	+	++	+	+	+	-
<u>Технологические показатели:</u> - простота изготовления - восстанавливаемость герметизирующих поверхностей	+	+	+	+	-	-	+	-
<u>Удобства эксплуатации:</u> - удобство монтажа - необходимость подтяжки - стоимость	----	-	----	+	-	----	+	----
	-	-	+	++	+	----	+	----
	уд	уд	уд	уд	высокая	высокая	низкая	высокая

Примечание. + - хорошо, -- плохо, уд – удовлетворительно.

Самые широкие возможности в повышении надёжности герметизации и ресурса уплотнителя предоставляет новый способ управления клапанами [14].

Проведённая работа позволила сделать следующие выводы и рекомендации.

1. Несмотря на многолетнюю потребность, отмечается застой в разработках надёжного сверхвысоковакуумного прогреваемого коммутационного оборудования. Отсутствие научно обоснованных рекомендаций по выбору узлов герметизации свидетельствует о наличии проблемной задачи и необходимости привлечения новых представлений о природе проходящих в зоне герметизации процессов, определяющих вакуумную плотность и эксплуатационную надёжность данных соединений.

2. На основании ранее представленной концепции конструирования соединений и понятия «отказа» предложено понятие «рационального герметизирующего контакта». В соответствии с принятыми модельными представлениями определены три деформационные схемы с достижением устойчивого воспроизведения условий многократного взаимодействия герметизирующих элементов при термодублировании разъёмных соединений.

3. Рассмотрены особенности течения пластичного уплотнителя у резких изломов геометрии герметизирующей поверхности. Рекомендуются наклонное взаимодействие герметизирующих элементов и локализация одной зоны герметизации с препятствием перемещения пластичного материала уплотнителя из участка герметизации на его свободную поверхность.

4. Проведено сравнение рекомендуемых конструктивных решений с основными схемами герметизации применяемых соединений. Указаны преимущества и недостатки предлагаемых деформационных схем узлов герметизации.

5. Настоятельно рекомендуется новый способ управления клапанами, повышающий надёжность герметизации клапана и ресурс работы уплотнителя.

6. Согласно рекомендациям изготовлены рабочие образцы соединений, которые успешно прошли испытания на герметичность при комнатной температуре. Возможная величина натекания находилась за порогом чувствительности средств течеискания.

7. Необходимо объединить усилия заинтересованных лиц для проведения всесторонних термомеханических испытаний опытных образцов соединений.

Литература

1. J.P. Boulloud, J. Schweitzer. Etude expérimental de joits métalliques pour ultra-vide, Vide, 1959, № 82.-Juillet-Août, pp.241-249.
2. С.Н. Домрачёв, В.Я. Моисеев, Г.Л. Саксаганский. Конструирование разъёмных вакуумных соединений с металлическими уплотнителями. Электронная техника, серия 4. Электровысоковакуумные и газоразрядные приборы. 1975 г., с.67 – 74.
3. A.Rot. Sealing mechanisms in bakeable vacuum seals The Journal of Vacuum Science & Technol. A1 (2), Apr-June 1983, p.211-219.
4. А.С.Шувалов. Соединительные элементы сверхвысоковакуумных систем. Вакуумная техника и технология, 1994 г., т.4, № 4, с.2-25.
5. В.В.Вязовецков. Экспериментальные результаты исследования герметизации сферических пар. Межвузовский сборник Электронное машиностроение, робототехника, технология ЭВП, М.1984 г., с.149-155.
6. В.В.Вязовецков. Вопросы конструирования сверхвысоковакуумных клапанов с деформируемым уплотнителем, межвузовский сборник Электронное машиностроение, робототехника, технология ЭВП. М. МИЭМ, 1986г., с. 81-86
7. В.В.Вязовецков. Механика герметизации в металлических уплотнениях. Тезисы докладов Всесоюзной конференции Современные вопросы механики и технологии машиностроения, ч. II, М. 1986 г., с.101.
8. В.В.Вязовецков, В.Л.Орлов, Н.И.Столяров. Выбор материала и испытания уплотнительных пар типа сталь-сталь для плоских затворов. Тезисы докладов научно-технической конференции Вакуумная наука и техника. Гурзуф 1994 г., с.156.
9. В.В. Вязовецков. Коммутационные устройства с радиальной герметизацией, тезисы докладов научно-технической конференции Вакуумная наука и техника, Гурзуф, 1999 г., с.35-36.

10. А.Е. Вязовецкова, В.В.Вязовецков, Е.В.Вязовецков. Обоснование выбора деформационных схем разъёмных цельнометаллических коммутационных устройств. /Материалы XX юбилейной научно-технической конференции Вакуумная наука и техника. Под ред. д.т.н., профессора Д.В. Быкова. М. МИЭМ, 2013, с.93 - 96.
11. У. Паркер, Дж.Марк. Большой прогреваемый вентиль для сверхвысоковакуумных систем. /Перевод докладов 7 симпозиума по вакуумной технологии, сборник статей Современная вакуумная техника, - М.: Издательство иностранной литературы, 1963г. с.116-120.
12. Д.Б.Зворыкин. Вопросы расчёта и конструирования цельнометаллических высоковакуумных систем и их элементов. Диссертация на соискание учёной степени к. т. н. М., 1955 г.
13. C.L. Foerster and D.McCafferty. Selection and evaluation of ultrahigh vacuum gate valve for ISABELLE beam line vacuum system. J.Vac.Sci.Technol. April 1981, p. 997-1000.
14. Патент на изобретение № 2348851 Российской Федерации «Способ дистанционного управлением клапаном варианты» / В.В. Вязовецков. – Опубликовано 10.03.2009 г., Бюл. №7, 2009г.

Влияние напряжения между электродами разрядной камеры и плотности разрядного тока на микротвердость модифицированного слоя стали 40X

***В.М. Шулаев, И.М. Пастух, Г.Н. Соколова, И.Ф. Михайлов, С.В. Суровицкий
НПП «НИТТИН», г.Белгород.***

Исследованы элементный и фазовый состав, структура и микротвердость поверхности образцов стали 40X после азотирования в тлеющем разряде. Безводородное модифицирование производилось вариацией энергетических параметров. Обнаружено, что наибольшее значение микротвердости в модифицируемом поверхностном слое достигается при максимальном энергетическом воздействии (большой плотности разрядного тока и высоком напряжении между электродами разрядной камеры) на поверхность.

Influence of voltage between eletrodes of the discharge chamber and the discharge current density on microhardness of steel 40X modified layer. V.M.Shulayev, I.M.Pastukh, G.N.Socolova, I.F.Mikhailov, S.V.Surovitskiy. The elemental and phase composition, structure and microhardness of steel 40X samples surface after nitriding in glow discharge have been investigated. Hydrogen-free modification has been carried out via variation of energetic parameters. It was found that maximal microhardness within modified surface layer is achieved via maximal energetic influence (high density of the discharge current and high voltage between electrodes of the discharge chamber) on the surface.

1. Введение

Химико-термическая обработка в тлеющем разряде является эффективной технологией модификации поверхности металлов, которая позволяет улучшать свойства их поверхностных слоев (твердость, коррозионную стойкость, износостойкость) путем изменения толщины диффузионной зоны и её фазового состава [1]. Азотирование оценивается как наиболее перспективный и отвечающий большинству современных требований технологический процесс [2]. Однако для его адекватной практической реализации необходимо реализовать концепцию управляемости результатов термообработки в зависимости от требований предстоящей эксплуатации изделия, прошедшего насыщение азотом [3]. Параметры модификации поверхности в тлеющем разряде в настоящее время определяются путем технологических проб [4]. До последнего времени традиционными технологическими параметрами считались – температура насыщения поверхности азотом, давление газовой смеси в разрядной камере, состав газовой смеси и продолжительность процесса азотирования. Но как показывает практика