

## Литература

1. Ivry Y., Surick J., Barzilay M., Kim Chung-Soo, Najafy F., Kalfon-Cohen E., Dane A.D., Bergren K.K. Superconductor-superconductor bilayers for enhancing single-photon detection. IOP Publishing. Nanotechnology 28, 207. 7p.
2. Кузмичев А.И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. Киев: Аверс, 2008. 244 с.
3. Ehasarian A.P., Wen J.G., Petrov I. Interface microstructure engineering by high power impulse magnetron sputtering for the enhancement of adhesion. Journal of Appl. Phys, 2007. 10p.
4. Моисеев К.М. Многопозиционные вакуумные технологические установки // Наноинженерия. – 2014. – № 8. – 18-21 с.

## **Формирование вакуумной плотности в сверхвысоковакуумных прогреваемых разъёмных соединениях**

*А.Е.Вязовецкова, В.В.Вязовецков*  
*Москва, РНТВО им. академика С.А. Векшинского*  
*aev241@yandex.ru, vyazovetskov@rambler.ru*

*Представлен график обобщённой зависимости натекания от усилия, прикладываемого к закрываемому разъёмному соединению. Обсуждается влияние строения уплотнителя, геометрии герметизирующей поверхности на подвижность поверхностного слоя уплотнителя. Указаны направления совершенствования фланцевых соединений и клапанов, а также конструктивное выполнение узлов герметизации.*

*Formation of vacuum density in ultrahigh-vacuum heated sectional. A.E. Vyazovetskova, V.V. Vyazovetskov. A graph of the generalized dependence of the leakage on the force applied to the closed plug connection is presented. The influence of the structure of the seal, the geometry of the sealing surface on the mobility of the surface layer of the seal is discussed. The directions of improvement of flange connections and valves, as well as the constructive implementation of sealing units are indicated.*

Успешная эксплуатация сверхвысоковакуумных систем невозможна без надёжного функционирования коммутационных устройств (фланцевых соединений и клапанов), являющихся наиболее многочисленными её элементами. Даже малая точь насыщает внутрикамерные поверхности газами атмосферы и препятствует достижению предельного давления. Наименее надёжным являются сверхвысоковакуумные прогреваемые коммутационные устройства с большими сечениями вакуумпроводов.

Целью доклада является обоснование рекомендаций выполнения коммутационных устройств, выполненное на основании изучения поверхностных деформационных процессов в зоне герметизации.

Разработка новых коммутационных устройств должна направляться на снижение величины натекания через разъёмное соединение и увеличение гарантированной работоспособности (количества закрытий устройств и термоциклирования в закрытом состоянии). Важными дополнительными требованиями являются создание и совершенствование дистанционного управления прогреваемых клапанов, использование освоенных материалов и технологий, минимальные эксплуатационные затраты (необслуживаемость устройств), сравнительно малая стоимость коммутационных устройств, снижение величины усилия герметизации и мощности привода.

Многие экспериментаторы изучали поведение потока натекания в цикле нагружения – разгрузки разъёмного соединения [1- 3]. На рис. 1 представлен график зависимости величины натекания от прикладываемого усилия герметизации в единичном цикле срабатывания разъёмного соединения, качественно обобщающий экспериментальные данные испытаний основных конструкций деформационных схем узлов герметизации.

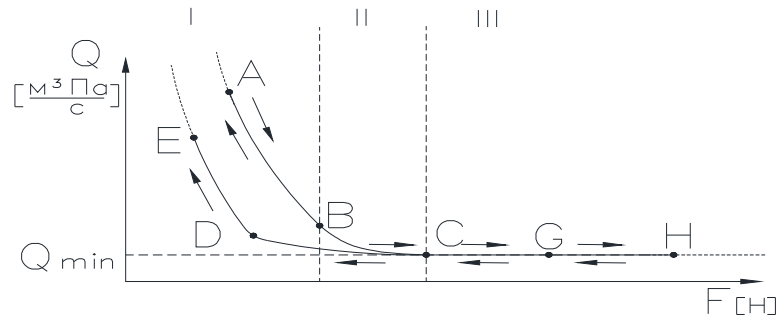


Рис. 1. График обобщённой зависимости потока натекания  $Q$  от прикладываемого аксиального усилия  $F$  в разъёмном соединении:

Кривая  $ABCGH$  – направление кривой графика при герметизации соединения, кривая  $HGCD E$  – направление кривой графика при снижении прикладываемых усилий к разъёмному соединению.  $Q_{min}$  – наименьшее значение потока натекания, проходящего через соединение.

I – зона активного заполнения газопроводящих каналов при герметизации; II – зона перераспределения прикладываемой к соединению энергии с поверхностной деформации на объёмную; III- зона объёмной деформации герметизирующих элементов.

В области I наиболее интенсивно перекрываются газопроводящие каналы в приповерхностной области контакта. В более пологой области II происходит перераспределение энергии не только на приповерхностную, но и на объёмную деформацию уплотнителя. Неспособность дальнейшего перекрытия газопроводящих каналов (канавок шероховатостей твёрдой герметизирующей поверхности) отражается в поведении графической зависимости в области III.

В области I наибольший наклон кривой графика имеют деформационные схемы с врезанием твёрдого выступа в пластичный массивный уплотнитель. Чем ближе угол наклона врезающей поверхности к оси отверстия и толще уплотнитель, тем быстрее начинается снижение потока натекания. Причём в данной схеме сопротивление внедрению выступа сравнительно мало и вакуумная плотность соединения при этом существенно не улучшается. Процесс сминания уплотнителя отличается тем, что кривая графика имеет явное стремление к стабилизации проходящего потока, несмотря на заметное нарастание нагрузки. Причём кривая смещается вправо и плато кривой натекания заметно выше, чем при врезании твёрдого выступа [ 2,3].

Кривая изменения величины натекания при разгрузке соединения всегда находится ниже линии графика, соответствующей предшествующему линии соответствующей увеличению усилия на соединение. Для клапанов-герметизаторов величина потока натекания может незначительно повышаться даже при снятии нагружения [ 4]].

Закономерности графических зависимостей мы связываем с наличием корреляционной зависимостью между вакуумной плотностью разъёмного соединения и перемещением материала уплотнителя в зоне герметизации при его силовом цикле нагружении в процессе эксплуатации. Регулировка подвижности поверхностных микроучастков уплотнителя на участке герметизации соединения позволит более плотно заполнять канавки шероховатостей герметизирующей поверхности и сохранить полученную вакуумную плотность контакта при термоциклировании соединения.

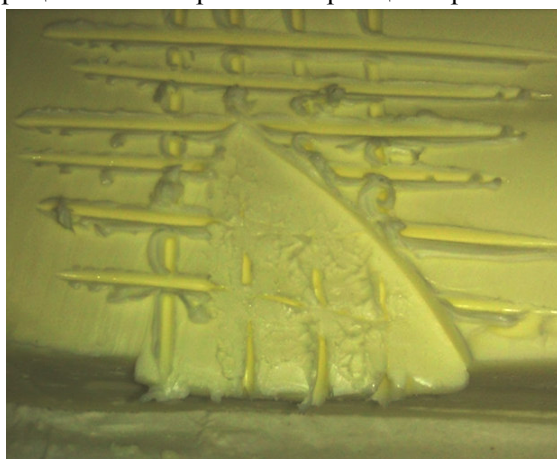
Оценка возможных полей деформации осуществлялась посредством универсального закона перемещения энергетического потока в открытой энергетической системе:

1. Из множества возможных траекторий перемещение будет осуществляться по направлению с минимальными затратами внешнего вносимого энергетического потока на внутренних противодействующих связях системы.

2. Если векторная величина внешнего энергетического потока недостаточна для преодоления этого барьера, то движения энергетического потока внутри системы не произойдёт.
3. Если векторная величина внешнего энергетического потока превосходит минимальные затраты по преодолению противодействующих связей, то перемещение энергетического потока обязательно произойдёт. При равенстве затрат на противодействующих связях перемещение энергетического потока частиц произойдёт по кратчайшему расстоянию (области). Движение энергетического потока (системы частиц) будет происходить по траектории (области) с максимально полным использованием подводимой энергии.

На рис. 2 наглядно показано перемещение поверхностных слоёв в пластичном материале на примере внедрения плоскости ножа в охлаждённое сливочное масло. Эксперимент проводился для наглядной демонстрации приповерхностного течения пластичного материала при внедрении в него жёсткой полуплоскости. Видно, что при малой энергии сопротивления перемещению пластичного материала вблизи свободного края масла поверхностные риски сохраняются, а при внедрении выступа в плоскость пластичного материала риски исчезают.

Согласно принятым представлениям во втором случае преодоление повышенного сопротивления перемещению материала на свободную поверхность сопровождалось наличием значительных поверхностных касательных течений. Предлагаемые нами деформационные схемы цельнометаллических узлов герметизации используют этот краевой эффект для достижения вакуумной плотности соединения, а также сохранение такого состояния в процессе многократного термоциклирования.



а



б

*Рис. 2. Приповерхностные течения пластичного материала при внедрении в него твёрдого выступа.*

*а – вид сверху отпечатка ножа на риски поверхности масла; б- деформация масла. вблизи свободного края.*

Экспериментально отмечено сохранение шероховатых выступов на поверхности пластичного материала при нормальном направлении взаимодействия с гладкой твёрдой поверхностью [5]. Это явление объясняется противодействием соседних энергетических зон деформации пластичных выступов [6]. Стабилизация потока натекания при смятии уплотнителя на сравнительно большом значении натекания наблюдается даже при повышенных усилиях герметизации [2,3]. Явление повышения жёсткости приповерхностного слоя плоскости упругого эластомера наблюдается при внедрении в него жестких штампов, размещённых на некотором расстоянии друг от друга [7, с.165-177]. Некоторое ослабление влияния соседних деформационных зон на заполнение канавок шероховатостей достигается при касательном взаимодействии наклонных герметизирующих поверхностей, что ведёт к снижению потока натекания при более низких значениях усилия герметизации [2,3].

Как уже указывалось, на некотором этапе повышения усилия герметизации энергетически становится выгоднее деформироваться материалу уплотнителя с расширением площади взаимодействия, а не заполнять микро зазоры контакта герметизирующих

поверхностей. Для стабилизации площади герметизирующего взаимодействия VATRING технология предусматривает точное выполнение герметизирующих элементов с их линейным герметизирующим контактом и покрытием одной из поверхности слоем серебра. В контакте твёрдых поверхностей с жёсткими упругими связями поверхностных слоёв достичь значительной вакуумной плотности невозможно.

На первых циклах термоциклирования обязательно происходит ослабление контакта, вызванное дополнительными расшатывающими напряжениями и ползучестью уплотнителя. Известна рекомендация формования уплотнителя и фланцев предварительным обжатием для повышения надёжности герметизации соединения, эксплуатируемого в условиях термоциклирования в области криогенных температур [8]]. Применение деформационных схем со сравнительно малыми напряжениями объёмных деформаций являются малонадёжными, требуют частых подтяжек и смен уплотнителя. Как и Д.Б.Зворыкин [1] мы рекомендуем держать соединения в напряжённом состоянии с некоторым перекрытием необходимой величины усилия герметизации. Такому состоянию с упругим поджатием соответствует точка G на рис.1.

На основании изучения деформационных процессов в зоне герметизации, сравнения результатов экспериментальных испытаний различных конструкций разъёмных соединений и работоспособности существующих сверхвысоковакуумных фланцевых соединений и клапанов сделаны следующие предложения и выводы:

1. Основными направлениями повышения качества сверхвысоковакуумных прогреваемых коммутационных устройств являются увеличение вакуумной плотности (снижение потока натекания), увеличение числа запирающих и термоциклирования соединения.
2. Указано на наличие корреляционной зависимости при создании и сохранении вакуумной плотности герметизируемого соединения от подвижности приповерхностных слоёв уплотнителя. В устройствах с массивным пластичным уплотнителем меньшую обслуживаемость и повышенную вакуумную плотность имеют деформационные схемы с большей величиной энергии, необходимой для деформирования уплотнителя в зоне герметизации.
3. На основании общей закономерности распространения энергетических потоков для повышения вакуумной плотности соединения рекомендуется использовать краевой эффект увеличения подвижности приповерхностного слоя уплотнителя вблизи твёрдого выступа с преимущественно касательным взаимодействием герметизирующих поверхностей. Ограниченное увеличение радиальной составляющей усилия герметизации поверхности способствует расширению петли гистерезиса натекания и снижению усилия герметизации.
4. С целью снижения микро коробления силовых герметизирующих элементов для крупногабаритных фланцевых и клапанных соединений рекомендуется применять гибкие упругие герметизирующие поверхности и систему равномерного упругого деформирования уплотнителя.

Убеждённости в реальности изготовления новых модернизированных сверхвысоковакуумных устройств с повышенной надёжностью герметизации основана на многолетней успешной эксплуатации и освоенной технологии изготовления отечественных прототипов (канавочно-клиновых фланцев, прогреваемых клапанов серии КЭУТ и прямопролётных затворов типа ЗПА).

#### Литература

1. Д.Б.Зворыкин «Вопросы расчёта и конструирования цельнометаллических высоковакуумных систем и их элементов». Диссертация на соискание учёной степени к. т. н. М., 1955 г.
2. 2.С.Н. Домрачёв, В.Я. Моисеев, Г.Л. Саксаганский «Конструирование разъёмных вакуумных соединений с металлическими уплотнителями.» Электронная техника, серия 4. Электровысоковакuumные 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. В.В.Вязовецков «Экспериментальные результаты исследования герметизации сферических пар». Межвузовский сборник «Электронное машиностроение, робототехника, технология ЭВП», М.1984 г., с.149-155.
5. A.J.W.Moore, “Deformation of metals in static and sliding contact”, Prjceedings of the royal society, Series A “Mathematical and Physical Sciences”, N1041, 7 December 1948, v.195, London.
6. T.H.C. Childs «The persistence of asperities in indentation experiments».–Wear, 1973, v.25, p.3-16.
7. Л.А. Галин «Контактные задачи теории упругости и вязко вязкоупругости». -М.: «Наука». 1980.-304 с.
8. Авторское свидетельство на изобретение № 1043411 А. Способ герметизации разъёмных криогенных трубопроводов. F 16L 19/00, F 16 L 23/00. Авторы: В.Г.Данченко,Ф.П.Савин, В.И.Косинский. Опубликовано в БИ № 33 1983г.

## Оценка влияния мощности разряда магнетронной распылительной системы на энергетическую эффективность распыления

*В.В. Тлявлин, П.В. Петухов, ЗауПхоАунг, Л.Л. Колесник*  
*г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1*  
*kolesnik@bmstu.ru*

*В работе исследованы закономерности эволюции тепловых процессов в мишени и камере МРС, а также описан баланс энергии на катодном узле магнетрона на постоянном токе. Установлено, что основным источником энергии является ионный ток разряда, а наиболее существенные компоненты стока энергии – тепловое излучение, энергия, расходуемая на испарение и распыление, энергия отраженных частиц, энергия, отводимая системой охлаждения магнетрона.*

*Estimation of impact of magnetron sputtering system power discharge on energy efficiency of sputtering. V. Tlyavlin, P. Petuhov, Zaw Phyo Aung, L.Kolesnik. The laws governing the evolution of thermal processes in the target and the MSS chamber are investigated, and the energy balance at the cathode node of the magnetron at a constant current is described. It has been established that the main source of energy is the ion discharge current, and the most significant components of the energy drain are thermal radiation, energy consumed for evaporation and sputtering, energy of reflected particles, energy removed by the magnetron cooling system.*

В работе исследованы закономерности эволюции тепловых процессов в мишени и камере МРС, а также описан баланс энергии на катодном узле магнетрона на постоянном токе. Установлено, что основным источником энергии является ионный ток разряда, а наиболее существенные компоненты стока энергии – тепловое излучение, энергия, расходуемая на испарение и распыление, энергия отраженных частиц, энергия, отводимая системой охлаждения магнетрона.

Актуальность работы обусловлена необходимостью нахождения зависимости энергетической эффективности распыления от варьирования режимов работы МРС для ее последующего усовершенствования.

В работе [2] для анализа энергетической эффективности этого типа устройств был предложен интегральный коэффициент энергетической эффективности  $K_w = \frac{\Delta m}{tW}$ , где  $\Delta m$  — полная масса распыленного материала катода,  $t$  — время распыления (мин),  $W$  — средняя интегральная мощность магнетронного разряда (Ватт).