

## УЛУЧШЕНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ КЛАПАНОВ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ТРЕНИЯ МЕЖДУ ЯКОРЕМ И КОРПУСОМ

### IMPROVING THE OUTPUT PERFORMANCE OF PROPORTIONAL GAS VALVES BY REDUCING FRICTION BETWEEN ANCHOR AND BODY

А.С.Ломакин, С.П.Бычков, А.А.Копылов

A.S.Lomakin, S.P.Bychkov, A.A.Kopylov

МГТУ им.Н.Э. Баумана, Москва

*В данной статье приведено описание экспериментов по исследованию влияния применения антифрикционного покрытия дисульфида молибдена ( $MoS_2$ ) на поверхности якоря электромагнитного пропорционального газового клапана из стали 16Х-ВІІ на выходные характеристики клапана. Описаны структурные особенности и свойства используемого покрытия из  $MoS_2$ . Приведена оценка результатов экспериментов.*

*This article describes experiments to study the effect of using an antifriction coating of molybdenum disulfide ( $MoS_2$ ) on the surface of an electromagnetic proportional gas valve made of 16X-VII steel on the valve output characteristics. The structural features and properties of the  $MoS_2$  coating are described. The evaluation of the experimental results is given.*

*Ключевые слова: трение, антифрикционное покрытие, дисульфид молибдена, узел «якорь-корпус», выходной поток газа, расход.*

*Keywords: friction, antifriction coating, molybdenum disulfide, anchor-body assembly, gas outlet flow, flow rate.*

#### ВВЕДЕНИЕ

В современном медицинском оборудовании, в том числе и в аппаратах ИВЛ, широко применяются пропорциональные газовые клапаны (рис.1).



Рис. 1. Пропорциональный газовый клапан ASCO 202.

На сегодняшний день в российских аппаратах ИВЛ используют зарубежные пропорциональные клапаны, так как характеристики российских пока им значительно уступают.

Одной из проблем, связанной с недостаточными выходными характеристиками российских пропорциональных клапанов, является низкое тяговое усилие, создаваемое катушкой индуктивности клапана. Устранение данной проблемы требует улучшения магнитных характеристик деталей клапана и снижения трения в узле «якорь-корпус».

В данной работе представлены результаты экспериментов по исследованию влияния антифрикционного покрытия (АФП) из дисульфида молибдена ( $MoS_2$ ) в

подвижном сочленении в узле «якорь-корпус» на улучшение выходных характеристик клапана с целью определения целесообразности применения данного технического решения.

## СТРУКТУРА И АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА

Применение АФП является одним из наиболее современных и перспективных способов снижения трения в подвижных сочленениях и защиты различных механизмов от интенсивного износа. АФП подобны краскам, но вместо красящего пигмента они содержат высокодисперсные частицы твердых смазочных веществ, равномерно распределенные в смеси связующих элементов и растворителей. После полимеризации антифрикционных покрытий сухие смазки и связующие элементы заполняют микронеровности поверхности, увеличивая ее опорную площадь. В процессе трения часть смазочных частиц переносится на сопряженную поверхность и ориентируется параллельно направлению движения. Таким образом, на обеих поверхностях образуется гладкая и скользкая защитная пленка.

Дисульфид молибдена является пластинчатым твердым материалом, состоящим из отдельных атомарно тонких плоскостей, которые могут легко скользить друг относительно друга. Благодаря этому  $\text{MoS}_2$  в качестве твердой смазки в современных технологиях занимает лидирующие позиции. Как и графит (другой пластинчатый материал),  $\text{MoS}_2$  может использоваться как сухая смазка, как добавка к маслам или консистентным смазкам, или как отдельный компонент композитного покрытия. Однако, в отличие от графита,  $\text{MoS}_2$  не требует влажных сред для хорошей работы, а в сочетании с его способностью надежно работать в широком диапазоне температур (от криогенного режима до нескольких сотен градусов Цельсия) и способностью эффективно работать в вакууме делает  $\text{MoS}_2$  привлекательным смазочным материалом практически для любых сфер промышленности.

На рис.2 представлены несколько видов морфологии поверхности  $\text{MoS}_2$  и композиционных материалов на его основе, полученных различными способами.

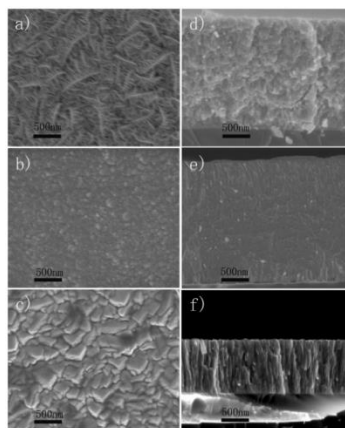


Рис. 2. Морфология поверхности трех различных покрытий:  
(a), (d) - покрытие из чистого  $\text{MoS}_2$ ; (b), (e) - покрытие  $\text{Mo}_2\text{N} + \text{MoS}_2$ ;  
(c), (f) - покрытие  $\text{Mo}_2\text{N}$ .

$\text{MoS}_2$  принадлежит к семейству слоистых двумерных дихалькогенидов переходных металлов (TMDS). Подобно графиту и гексагональному нитриду бора, его кристаллическая структура состоит из ковалентно связанных листов, которые образуют стопки, удерживаемые вместе только за счет слабых ван-дер-ваальсовых взаимодействий. Он встречается в природе как минерал молибденит.  $\text{MoS}_2$  имеет несколько различных возможных структур (политипов) в зависимости от соединения листов и стопки листов. В то время как графит имеет одну плоскость атомов на листе, в  $\text{MoS}_2$  каждый лист состоит из плоскости атомов Mo, зажатой между двумя плоскостями атомов S. Однослойная

структура может иметь тригонально-призматическую координацию вокруг Мо, которая представляет собой гексагональную структуру, или октаэдрическую связь, которая является тригональной фазой [1, 2].

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах было исследовано влияние трения на величину выходного потока газа в пропорциональном клапане российского производства, предназначенного для аппаратов ИВЛ. Эксперимент заключался в сравнении выходного потока клапана из стали 16Х-ВИ с АФП, нанесенным на якорь, и без него.

### СБОРКА КЛАПАНА

В корпус клапана (рис.3) закрывалась сборка, состоящая из якоря (2), мембраны (10), плоской пружины (5) и тарелки клапана (6). Сборка закрывалась привертной втулкой (13), в которую вкручивалось выходное сопло (15). Сопло, в свою очередь, фиксировалось гайкой (16). С обратной стороны корпуса закладывалась катушка индуктивности (1) и фиксировалась сердечником (4) и вставленным в него регулировочным винтом (17). В первом случае был использован якорь из стали 16Х-ВИ без покрытия, во втором – с АФП  $\text{MoS}_2$ .

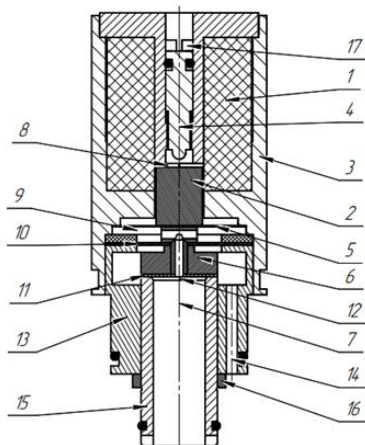


Рис. 3. Схема электромагнитного пропорционального клапана: 1 – катушка индуктивности, 2 – якорь, 3 – стенка корпуса, 4 – сердечник, 5 – плоская пружина, 6 – тарелка клапана, 7 – входное отверстие, 8 – рабочий зазор, 9 – пространство за клапаном, 10 – мембрана, 11 – резиновое уплотнение, 12 – седло клапана, 13 – привертная втулка, 14 – выходное отверстие, 15 – выходное сопло, 16 – гайка, 17 – регулировочный винт.

### ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ КЛАПАНА

При подаче управляющего сигнала в катушку индуктивности (1), в магнитозамкнутом контуре, состоящем из якоря (2), стенок корпуса (3), сердечника (4) генерируется рабочий магнитный поток. Магнитный поток создаёт тяговое усилие, перемещающее якорь (2) к сердечнику (4), при этом противодействуя силе плоской пружины (5) плотно прижимающей тарелку клапана (6) к седлу клапана (12) через резиновое уплотнение (11), в результате чего клапан открывается. При отсутствии тока в катушке, пружина (5) удерживает клапан в закрытом положении (нормально-закрытый клапан). Величина магнитной напряжённости в рабочем зазоре (8), создаваемая током, протекающим в катушке индуктивности (1), характеризует ход сердечника, т.е. степень открытия клапана. В идеальном случае степень открытия клапана (расход) и ток (управляющий сигнал) имеют линейную зависимость. Для предотвращения случайного открытия клапана при увеличении входного давления рабочего газа, в конструкции клапана предусмотрено технологическое отверстие, соединяющее входное (7) и выходное

(14) отверстия и пространство за клапаном (9), что позволяет компенсировать силу, действующую на тарелку клапана (6) при перепаде давлений [3, 4].

### УСТАНОВКА КЛАПАНА И РЕГУЛИРОВКА ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

После сборки клапан закреплялся в испытательном стенде посредством картриджной системы и фиксировался в самом картридже. На стенд подавался воздух под давлением 3 Бар – рабочем давлении аппаратов ИВЛ.

При подаче воздуха при заданном давлении с помощью осциллятора от 0 до 99 % регулировалась скважность, производилась настройка клапана регулировкой величины зазора между якорем и сердечником. Данная регулировка осуществлялась с помощью регулировочного винта, для более точной настройки следует также отрегулировать положение сердечника и сопла клапана (данная регулировка осуществляется для устранения залипания клапана при любой скважности). Проведение настройки клапана необходимо при каждой его пересборке.

После настройки клапан готов к тестированию.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

При проведении рассматриваемых экспериментов основным фактическим выходным параметром являлось напряжение, снимаемое с расходомера при различных значениях расхода газа, обеспечиваемого клапаном. Измерение напряжения в данных экспериментах производилось на массовом расходомере AWM700 Series Airflow Sensor фирмы Honeywell [6].

Каждому значению выходного напряжения на расходомере соответствует определенное значение выходного потока газа в соответствии с паспортными характеристиками расходомера. Калибровочная кривая для преобразования измеренного значения напряжения в значение выходной потока газа для данного AWM700 Series Airflow Sensor представлена на рис.4.

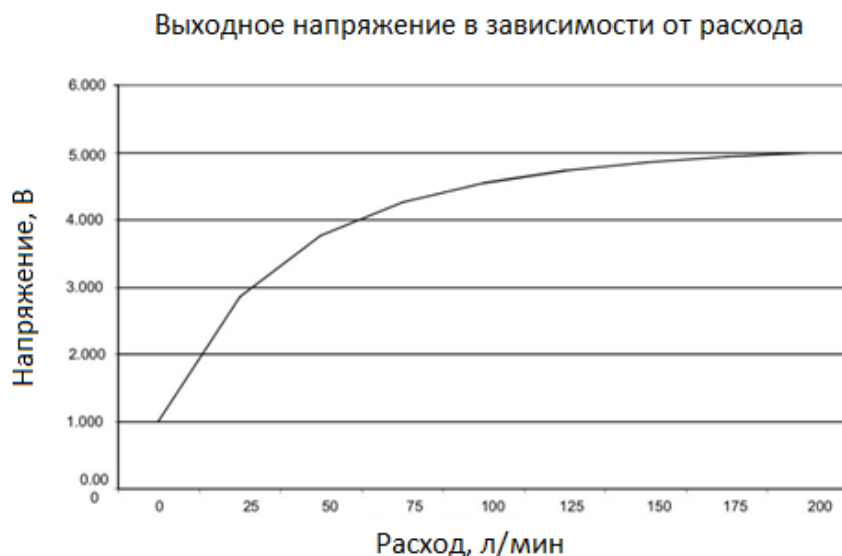


Рис. 4. График зависимости расхода от напряжения для расходомера Honeywell AWM700 Series Airflow Sensor.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В таблице 1 приведены значения выходных параметров для клапана без АФП на поверхности якоря.

Таблица 1.

Зависимость выходных параметров от скважности для клапана без АФП.

Скважность, %	Ток в катушке, А	Напряжение, В	Поток газа, л/мин
30	0,02	1,007	0
45	0,042	1,01	13
60	0,073	1,017	13
75	0,112	1,245	15
90	0,159	2,84	39
99	0,19	4,35	95
85	0,139	4,235	86
70	0,095	2,025	24
55	0,059	1,125	14
40	0,032	1,013	13
30	0,019	1,009	0

В таблице 2 приведены значения выходных параметров для клапана с нанесенным АФП на поверхности якоря.

Таблица 2.

Зависимость выходных параметров от скважности для клапана с АФП.

Скважность, %	Ток в катушке, А	Напряжение, В	Поток газа, л/мин
32	0,022	1,004	0
45	0,041	1,095	13
60	0,071	2,205	27
75	0,11	3,3	48
90	0,156	4,195	84
99	0,186	4,58	118
85	0,135	4,1	78
70	0,092	3,39	51
55	0,058	2,74	36
40	0,032	1,3	16
30	0,019	1,022	14

При сопоставлении приведенных в таблицах 1 и 2 данных (рис. 5) видно, что в клапане с АФП при одинаковых, в пределах погрешности, значениях тока катушки характеристики выходного напряжения, а, следовательно, и выходного потока существенно выше, чем в клапане без АФП. Также на графиках (рис. 5) видно, что площадь петли гистерезиса в клапане с АФП уменьшилась по сравнению с клапаном без АФП, а ее форма стала стремиться к форме петли зарубежного клапана. Более того, максимальное значение выходного потока в клапане с MoS<sub>2</sub> близко к значению максимального выходного

потока клапана ASCO202. Выходные параметры оригинального клапана приведены в таблице 3 [5] и на рис.5.

Таблица 3.

Зависимость выходных параметров от скважности для клапана ASCO 202.

Скважность, %	Ток в катушке, А	Напряжение, В	Поток газа, л/мин
35	0,026	1	0
45	0,042	2,05	24
60	0,073	3,85	66
75	0,113	4,49	107
90	0,159	4,69	132
99	0,19	4,64	125
85	0,138	4,659	128
70	0,095	4,395	98
55	0,059	3,635	58
40	0,033	1,425	17
30	0,02	1	0

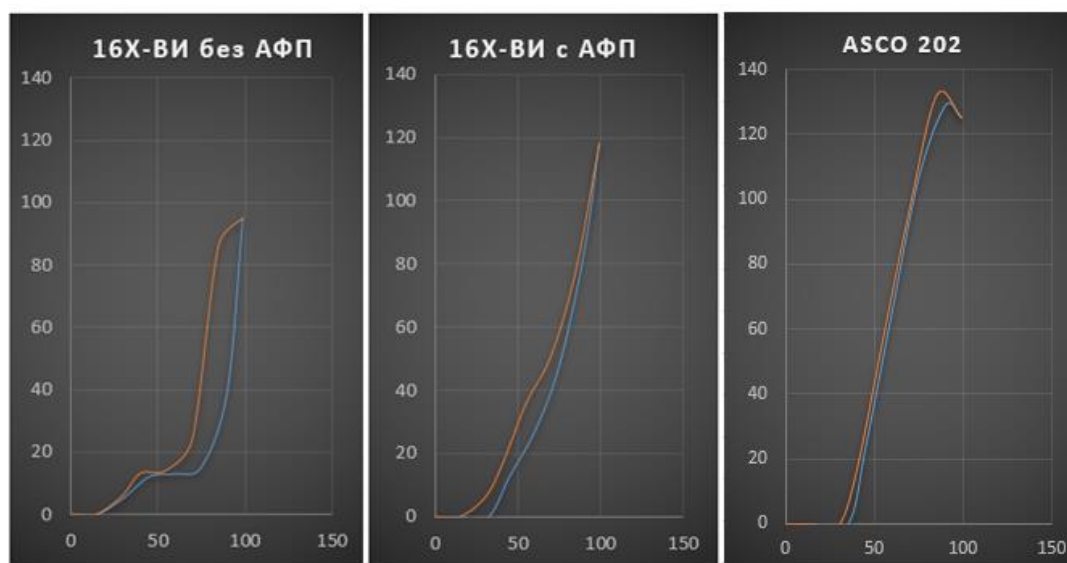


Рис.5. Графики зависимости выходного потока от скважности в форме петель гистерезиса для клапана из 16X-ВИ с АФП и без него и для оригинального клапана ASCO202.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент показал, что применение АФП существенно влияет на величину выходного потока газа пропорционального клапана, а, именно, с помощью покрытия его удалось повысить на 19,5 %. При этом различие выходных характеристик российского клапана и оригинального клапана ASCO 202 сократилось с 28 до 10,5 %.

Помимо повышения величины максимального потока, стоит отметить и уменьшение влияния остаточной намагниченности материала, что делает работу клапана более эффективной.

Полученные результаты позволяют предполагать значительное улучшение требуемых характеристик клапана при усовершенствовании наносимого антифрикционного покрытия и более эффективном подборе основных материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Malykote from dow corning. Руководство по выбору антифрикционных покрытий. Корпорация DowCorning, 2008. – 31 с.
2. Mohammad R. Vazirisereshk, Ashlie Martini, David A. Strubbe and Mehmet Z. Baykara, Solid Lubrication with MoS<sub>2</sub>: A Review // Lubricants, № 7(7), 57, 2019, – 35 p.
3. Bürkert fluid control systems. Пропорциональные клапаны. Обзор. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://burkert.su/page-downloads>. – (Дата обращения : 10.03.2021).
4. Щучинский С. Х. Электромагнитные приводы исполнительных механизмов. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 152 с., ил.
5. Пропорциональные клапаны ASCO™ Preciflow серии 202. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.emerson.ru/ru-ru/catalog/automation-solutions-ru-ru/fluid-control-pneumatics/microfluidic-valves/asco-202-preciflow-ru-ru>. – (Дата обращения : 07.05.21).
6. AWM700 Series Airflow Sensors. Installation instruction. Honeywell International Inc., march 2010.

#### ПОЛУЧЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

#### FORMATION OF DIFFERENT STRUCTURES BY THE METHOD OF RAPID THERMAL PROCESSING

**А.С.Ковалева, С.П.Бычков**

**A.S.Kovaleva, S.P.Bychkov**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

*В работе рассмотрены различные структуры, получаемые методом быстрой термической обработки (БТО). Описаны процессы их получения, необходимые температурные режимы, особенности физико-химических превращений. Выделены температурные зоны БТО, проведена оценка требуемых мощностных характеристик нагревательного устройства для получения заданной температуры.*

*This article discusses various structures produced by Rapid Thermal Processing (RTP). The processes of their preparation, the required temperature conditions, and the features of physical and chemical transformations are described. The temperature zones of the RTP are identified, and the required power characteristics of the heating device are assessed to obtain the given temperature.*

*Ключевые слова: быстрая термическая обработка, БТО, тонкие плёнки.*

*Key words: Rapid Thermal Processing. RTP, thin films.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Быстрая термическая обработка (БТО) – процесс производства полупроводниковых или легированных структур, при котором обрабатываемая подложка, на поверхности