

Применение композиционных материалов на основе термостойких полимеров в шаровых кранах с пробкой в опорах

К.Ю. Зерщиков, Ю.В. Семенов,
ООО «Константа-2», г. Волгоград

» Эксплуатационные характеристики шаровых кранов (ШК) в отношении применяемых материалов определяются двумя основными группами показателей. Во-первых, свойствами, определяющими прочность и деформируемость материалов, к которым относятся предел прочности или текучести, модуль упругости, относительная деформация при предельном состоянии (это либо разрушение, либо пластическая деформация), термостойкость [1]. Вторая группа включает свойства, определяющие герметичность, к которым относятся характеристики твердости, жесткости или податливости, стабильности размеров при термоциклировании.

Основным направлением совершенствования шаровой запорной арматуры является повышение ее надежности и долговечности при повышенных до $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$ и пониженных до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ температурах, а также при повышенных до 100–150 МПа давлениях, а для востребованной сегодня арматуры для сжиженного газа – для эксплуатации в условиях температур до $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это особенно актуально при эксплуатации ШК в коррозионноактивных и экологически опасных средах, что чаще всего имеет место в нефтегазодобывающей и перерабатывающей промышленности.

Внедрение новых материалов, применяемых при изготовлении крана, наталкивается на сложность прогнозирования показателей надежности и долговечности. Непросто прогнозировать изменение этих показателей без анализа результатов длительной эксплуатации ШК и нахождения их корреляции со свойствами материалов. Но согласно [2] безусловна следующая зависимость: чем более высокие характеристики эксплуатации обеспечиваются применяемыми материалами, тем выше надежность и долговечность, поэтому, используя в конструкции ШК материалы, обеспечивающие максимальные показатели, мы повышаем их надежность и долговечность.

Для высоких параметров эксплуатации давно и успешно применяют шаровые краны с пробкой в опорах. Не касаясь конструк-

тивных особенностей, основные узлы такого крана, ответственные за его характеристики, в которых применяются полимерные материалы, – это уплотнения шара-пробки и подшипники скольжения шпинделя. Соответственно, на улучшение свойств этих элементов должны быть направлены основные усилия, и задача прогнозирования их работоспособности сводится к установлению зависимости свойства материала – эксплуатационные характеристики – надежность, долговечность.

В [3] были обозначены основные свойства материалов уплотнения, которые важны для расчета рабочих характеристик шаровых кранов с плавающей пробкой. С точки зрения действующих усилий очевидно, что они идентичны и для кранов с пробкой в опорах, поэтому будем использовать давно известную и зарекомендовавшую себя методику расчета седел на прочность [4] с некоторыми коррективами согласно [3].

Согласно [4], в шаровых кранах с пробкой в опорах усилие P , действующее со стороны пробки на седло, зависит от схемы уплотнения: за или перед шаром. В отличие от ШК с плавающей пробкой, где шар прижимается давлением к седлу, в ШК с пробкой в опорах седло прижимается к пробке (рис. 1). Соответственно, усилие, действующее на уплотнение, зависит от его диаметров наружного D и внутреннего d и от наружного диаметра плавающей втулки D_1 , в которой закрепляется уплотнение. Для решения задачи определения физико-механических свойств материала уплотнения, исходя из заданных условий эксплуатации, введем некоторые упрощения. Так как для крана с уплотнением перед пробкой должно соблюдаться условие $D_1 > D$, с целью упрощения расчетов примем $D_1 = 1,1D$, что близко к практическим значениям. Усилие от пружин, необходимое для создания начального контакт-

ного давления согласно рекомендациям [4], примем равным $0,1P$. Тогда нормальные напряжения сжатия, действующие в уплотнении, рассчитываются по упрощенной формуле:

$$\sigma = P \cos \varphi / S = 0,53 \cdot 1,1p(D_1^2 - d^2) / (D^2 - d^2) = 0,58p(1,21D^2 - d^2) / (D^2 - d^2), \quad (1)$$

где p – давление среды, d – внутренний диаметр уплотнения, который для полнопроходных кранов можно принять равным условному проходу, $\cos \varphi = 0,71$, поскольку угол φ равен 45° или близок к этой величине. Прочность материала седла будет обеспечена при условии $\sigma \leq [\sigma]$, где $[\sigma] = \sigma_{сж} / k$, $\sigma_{сж}$ – предел текучести или предел прочности при сжатии при рабочей температуре, $k = 1,5$ – коэффициент запаса [3]. Решая это уравнение относительно D , получим:

$$D = d(([\sigma] - 0,58p) / ([\sigma] - 0,7p))^{1/2} \quad (2)$$

или переходя к $\sigma_{сж}$

$$D = d((\sigma_{сж} - 0,87p) / (\sigma_{сж} - 1,05p))^{1/2}. \quad (3)$$

Несложные вычисления показывают, что усилие, действующее на уплотнение в ШК, уплотняющимся за пробкой при одинаковой величине d , ниже, чем в кране с уплотнением перед пробкой, поэтому с некоторым запасом прочности и для этого исполнения крана можно воспользоваться полученным соотношением (3). Проведенные расчеты позволяют решать две задачи: проверять возможность использования материала для уплотнения, исходя из условий эксплуатации шарового крана, или рассчитывать геометрию уплотнения при выбранном материале и заданных рабочих характеристиках. Безусловно, это приближенные вычисления,

но для инженерных расчетов они достаточны, чтобы определить величину действующих напряжений и подобрать материал с соответствующими свойствами.

Анализ показывает, что при $p > \sigma_{сж}$ равенство (3) теряет смысл. Это является подтверждением того, что свободно установленное уплотнение не может работать при давлении, превышающем его прочность. На рис. 2 показано решение этого уравнения относительно p для различных условных проходов и для разных материалов. В исследовании оценку проводили для ранее применявшихся мате-

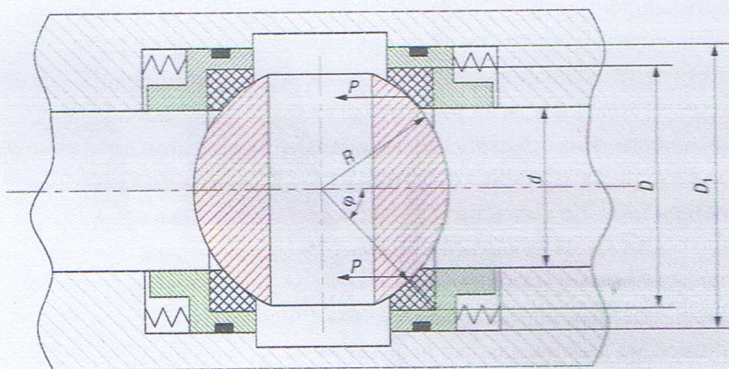


Рис. 1. Схема для расчета напряжений, действующих в ШК с пробкой в опорах

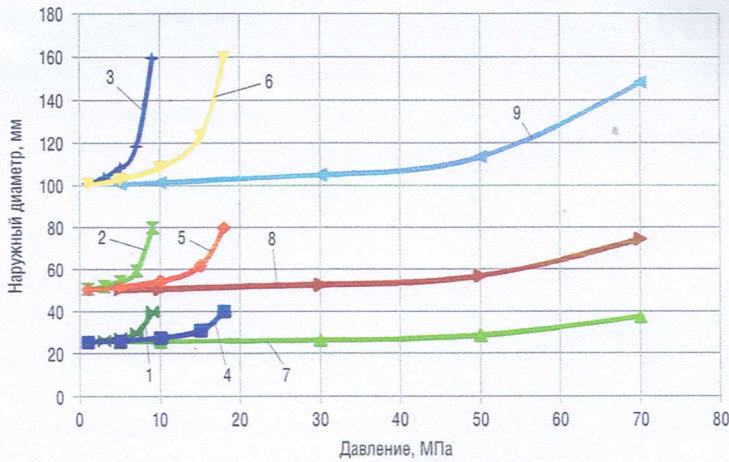


Рис. 2. Зависимость наружного диаметра уплотнения полнопроходного крана от давления среды из фторопласта 4 (1, 2, 3), Констафтора 400 (4, 5, 6), Констафтора 1000П1 (7, 8, 9); 1, 4, 7 – DN 25; 2, 5, 8 – DN 50; 3, 6, 9 – DN 100

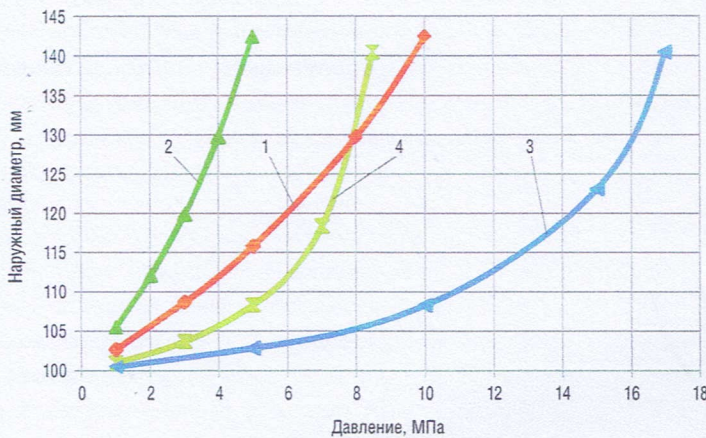


Рис. 3. Сравнение зависимостей наружного диаметра от давления для уплотнений шарового крана DN 100 с плавающей пробкой (1, 2) и пробкой в опорах (3, 4) из Констафтора 400 (1, 3) и Ф-4 (2, 4)

риалов Ф-4, К-400, К-1000П. Как видно, уплотнение из фторопласта при приемлемых размерах не позволяет применять его при давлении выше 4–5 МПа, что и наблюдается на практике. Увеличение деформационно-прочностных свойств Констафтора 400 (К-400) позволяет расширить границу применимости до 10–12 МПа, а для Констафтора 1000П1 (К-1000П1) – до 40–50 МПа при нормальной температуре эксплуатации, причем с ростом условного прохода граница по давлению сдвигается в область меньших величин [3]. А применение для уплотнения Констафтора 1000, имеющего предел прочности при сжатии 200 МПа, позволяет достичь давления эксплу-

необходимо на основе экспериментальных данных подставить в формулу (3) значение $\sigma_{сж}$, определенное при соответствующей температуре (табл. 1). Для при-

тации 100–150 МПа, в зависимости от условного прохода.

В работе [3] были проведены расчеты напряжений, действующих в уплотнении ШК с плавающей пробкой. Сравнение этих зависимостей с приведенными здесь для ШК с пробкой в опорах подтверждает, что шаровые краны с пробкой в опорах могут эксплуатироваться при более высоких давлениях, так как напряжения, действующие в уплотнении при прочих равных условиях, ниже, чем в уплотнении крана с плавающей пробкой. Согласно проведенным расчетам, полагая ширину уплотняющего пояса 10 мм, шаровой кран DN100 с плавающей пробкой с уплотнением из Констафтора 400 можно эксплуатировать при давлении до 6 МПа, тогда как при использовании уплотнения из фторопласта 4 – до 3 МПа. При переходе к ШК с пробкой в опорах эти границы сдвигаются до 14 МПа и 7 МПа соответственно (рис. 3).

Если же уплотнение не является свободным, а закреплено в обойме, то его напряженно-деформированное состояние может измениться от одноосного сжатия к всестороннему сжатию или близкому к нему, и нельзя в качестве критерия принимать значение $\sigma_{сж}$, полученное из стандартных испытаний на сжатие, поскольку эта величина может быть существенно выше.

Легко построить аналогичные зависимости для повышенных температур эксплуатации. Для этого

Таблица 1

Материал	Предел текучести при сжатии при температуре, МПа	
	25 °С	150 °С
Фторопласт 4	10	1
Констафтор 400	17	10
Констафтор 1000П1	37	25

мера на **рис. 4** приведены зависимости наружного диаметра уплотнения для Констафторов и фторопласта 4, построенные для температуры 150 °С.

График показывает, что при температуре 150 °С кран с уплотнением из фторопласта может эксплуатироваться при давлениях до 0,7 МПа, из композитов К-400 и К-1000П1 – при давлениях 7 и 20 МПа соответственно, что показывает перспективность применения этих материалов. Как видно из **рис. 2–4**, достаточно легко определить номинальные давления, при которых может эксплуатироваться кран при заданных температурах. Достаточно экспериментально определить предел текучести при сжатии для пластичных материалов или предел прочности для хрупких при интересующей температуре и по формуле (3) рассчитать для данного условного прохода и давления среды наружный диаметр уплотнения. Высота уплотнения задается из конструктивных соображений.

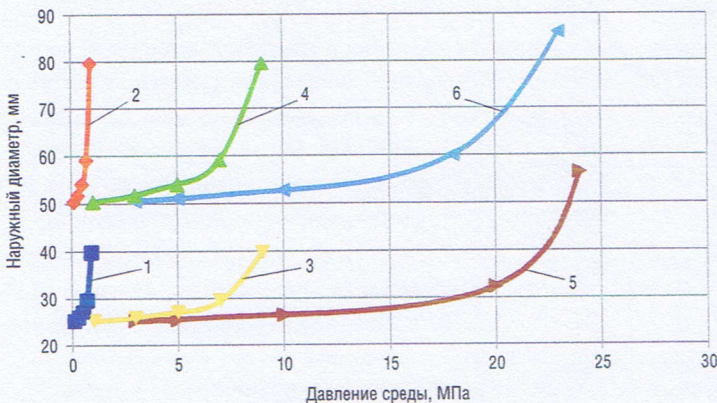


Рис. 4. Зависимость наружного диаметра от давления среды при 150 °С при использовании в качестве уплотнения Ф-4 (1, 2); К-400 (3, 4); К-1000П1 (5, 6) в полнопроходных кранах DN 25 (1, 3, 5) и DN 50 (2, 4, 6)

Однако, предельная температура эксплуатации определяется не только прочностью, но и теплостойкостью – максимальной температурой, при которой отсутствует деформация под нагрузкой. Эта величина характеризует сопротивление материала деформированию под напряжением при повышенных температурах. Поскольку уплотнение в шаровом кране находится под напряжением сжатия, то важна устойчивость материалов деформированию сжатия при интересующих нас температурах: 150 °С и 200 °С. Теплостойкость определяли на приборе для термомеханических испытаний: образец в виде таб-

Таблица 2. Теплостойкость материалов

Материал		Ф-4ПН	Констафтор 400	Констафтор 1000П1
Деформация под давлением 10 МПа за 24 ч, %	при 150 °С	4,5	1,3	0
	при 200 °С	22	2	1

летки нагружался индентором под давлением 10 МПа в течение 24 ч при фиксированной температуре, которая поддерживалась с точностью ±1 °С, измерялась величина внедрения индентора в таблетку и рассчитывалось отношение ее к толщине таблетки. Максимальная температура, при которой деформация не превышает 1%, определяет теплостойкость материала.

Представленные в **табл. 2** данные свидетельствуют о высокой теплостойкости материалов серии Констафтор.

Таким образом, можно утверждать, что возможна длительная эксплуатация шаровых кранов с пробкой в опорах при температуре 150 °С, используя уплотнения из К-400 при давлении до 7 МПа и из К-1000П1 при давлении до 20 МПа.

Безусловно, чтобы сделать окончательный вывод о справедливости вышеизложенного, необходимо провести ресурсные испытания.

Подтверждением предложенной методики расчета являются данные производителей о предельных параметрах применения по давлениям и температурам уплотнений из фторопласта и коксонаполненной композиции на его основе в шаровых кранах с плавающей пробкой. Аппроксимируя эти данные линейной зависимостью, можно получить некоторое представление о возможном применении материалов для конкретных условий работы (**рис. 5**). Такая аппроксимация

представляется возможной в силу линейной зависимости прочности материала от температуры [8].

Согласно приведенным данным, уплотнения из Ф-4 можно эксплуатировать при температуре 150 °С при давлении не более 2 МПа, тогда как расчеты дают величину 0,7 МПа. Сравнение показывает, что данные производителей несколько выше полученных расчетных характеристик, что отражает известную тенденцию, однако в пределах точности, предъявляемой к инженерным расчетам, эти данные вполне сопоставимы с полученными расчетным путем.

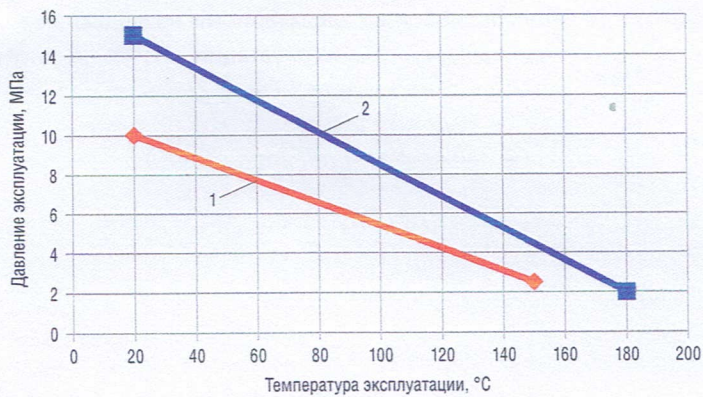


Рис. 5. Соотношение рабочих характеристик – максимальной температуры эксплуатации и соответствующего ему давления рабочей среды, на которые рассчитаны уплотнения из фторопласта Ф-4 (1) и композита Ф4К20 (2)

Важным элементом шарового крана с пробкой в опоре является шпindelный узел, который воспринимает основную нагрузку от давления среды и обеспечивает вращение пробки. Основные требования, предъявляемые к этому узлу: достаточная прочность и жесткость для исключения избыточной деформации под нагрузкой и низкое трение при вращении.

В шаровых кранах с пробкой в опорах в шпindelном узле нашли применение различные виды подшипников. Однако все они имеют те или иные недостатки. Подшипники качения имеют невысокую нагрузочную способность при больших габаритах и необходимость смазки. Бронзовые подшипники имеют низкую износо- и коррозионную стойкость, большие габариты и массу, высокий коэффициент трения, требующий применения смазки. Недостатками полимерных подшипников являются большой температурный коэффициент линейного расширения и, соответственно, трудность регулирования зазора для обеспечения стабильной работы при температурных колебаниях, низкая теплопроводность, высокая деформируемость (табл. 3).

Применение металлополимерных подшипников (МПП) позволяет нивелировать эти недостатки, поскольку они обладают наилучшим сочетанием свойств: низкого коэффициента трения, малых габаритов с высокой несущей способностью, малой чувствительностью к температурным колебаниям. В работах [5, 6] были определены критерии работоспособности металло-фторопластовых подшипников скольжения, которые состоят из металлической подложки, адгезионного подслоя и фторопластового слоя, усиленного стеклотканью, и обозначены максимальные параметры их эксплуатации: давление на подшипник в статическом положении не более 400 МПа при нормальной температуре и максимальная температура эксплуатации +250 °C, коэффициент сухого трения скольжения не более 0,1. Ранее было установлено, что предел текучести фторопласта при +150 °C не превышает 1 МПа, следовательно, в первом приближении можно положить, что предельное давление, выдерживаемое подшипником при этой температуре, будет существенно ниже и по нашим оценкам не должно превышать 1 МПа. Сказывается также падение адгезионной прочности в системе сталь-полимер с возрастанием температуры. Это обстоятельство необходимо учитывать при эксплуатации шаровых кранов с фторопластовым антифрикционным слоем в подшипниках МПП.

Следовательно, для более высоких параметров эксплуатации существует необходимость совершенствования подшипников скольжения с целью увеличения несущей способности при предельных температурах эксплуатации. Поскольку конструктивные параметры существующих подшипников изменять нежелательно как по причине перепроектирования кранов, так и потому, что они обладают вышеобозначенными преимуществами: малые габариты и вес, оптимальным представляется приме-

не-... (text continues from previous block)

Таблица 3. Свойства материалов, применяемых для изготовления подшипников скольжения

Материал	Деформация под нагрузкой 100 МПа, %	Прочность при 150 °C, МПа	Коэффициент сухого трения скольжения	Относительная износостойкость	КТЛР, 1/град	Стойкость в агрессивных средах
Бронза	5	100	0,35–0,45	1	$1,7 \cdot 10^{-5}$	Ограниченная
Полимерный композит	5	10	0,2–0,3	5	$5 \cdot 10^{-5}$	Отличная
МПП с антифрикционным слоем на основе ПФС или РЕЕК	1	120	0,12–0,18	10	$1,2 \cdot 10^{-5}$	Отличная

нение в качестве антифрикционного слоя более термостойких полимеров.

В связи с этим были разработаны металло-полимерные подшипники с антифрикционным слоем из армированной стеклянными или углеродными волокнами композиции Констафтор на основе полиэфирэфиркетона и полифениленсульфида. Имея более высокий коэффициент трения – до 0,15 по сравнению с 0,1 для МПП с фторопластовым антифрикционным слоем, они, тем не менее, существенно превосходят их по термостойкости (табл. 2). Кроме обозначенных преимуществ в термостойкости и прочности, они обладают высокой износостойкостью, что в отдельных применениях крайне актуально.

Оценим факторы, влияющие на изменение момента вращения пробки, при замене материала антифрикционного слоя. Согласно [4] момент, требуемый для поворота пробки, вызванный ее трением в подшипниках:

$$M = P f_1 d_1 / 2,$$

где: f_1 – коэффициент трения в паре шпindel-подшипник, d_1 – диаметр шпинделя, $P = p \pi D^2 / 4$ – усилие от давления среды на подшипники.

Тогда $M = 0,125 p D^2 f_1 d_1$, и выразив D через диаметр условного прохода d и ширину уплотнения b , получим:

$$M = 0,125 p (d + b)^2 f_1 d_1. \quad (4)$$

Полученная зависимость показывает, что момент, требуемый для вращения пробки, растет с ростом давления, коэффициента трения, диаметра шпинделя, условного прохода и ширины уплотнения. Замена материала антифрикционного слоя на более прочный, но с более высоким коэффициентом трения приведет, с одной стороны, к увеличению момента, но также и к снижению его за счет уменьшения ширины уплотнения. Таким образом, суммарное воздействие на изменение момента может быть незначительным, и не потребует более мощный привод.

Как следует из данных табл. 3, очевидные преимущества подшипников МПП позволяют рекомендовать их для замены бронзовых в узлах вращения пробок.

Необходимо также отметить, что подшипники МПП с фторопластовым антифрикционным слоем при определенных доработках могут эксплуатироваться при криогенных температурах, поскольку при снижении температуры эксплуатации прочность антифрикционного слоя растет, но он не становится хрупким вплоть

до -250 °С. Таким образом, разработанные композиционные материалы за счет увеличения термостойкости и прочностных характеристик позволяют не только поднять параметры эксплуатации, но и уменьшить массогабаритные характеристики вновь проектируемых кранов. Надежность и долговечность конструкций, в которых применяют материалы с более высокими свойствами, также должны вырасти. Кроме того, существует возможность без изменения компоновки и размеров крана поднять его характеристики за счет замены материала уплотнения шара.

Как отмечается в [7], для количественной оценки параметров уплотнений основным источником являются экспериментальные данные, то есть окончательный вывод о рабочих характеристиках уплотнения может дать только эксперимент, причем в условиях, максимально приближенных к рабочим. Поэтому крайне важно для подтверждения полученных результатов, а также оценки надежности и долговечности, проведение испытаний материалов в составе изделий, а для этого необходимо тесное взаимодействие разработчиков материалов с производителями запорной арматуры.

⇒ Список литературы

1. Зерщиков К.Ю., Семенов Ю.В. и др. Полимерные уплотнения для экстремальных условий эксплуатации // Трубопроводная арматура и оборудование, 2007, № 3 (30), с. 55–56.
2. ГОСТ 27.003-90 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
3. Зерщиков К.Ю., Семенов Ю.В., Кузахметова Е.К. Материалы серии «Констафтор» для уплотнений шаровых кранов // Арматуростроение, 2014, № 4 (91), с. 52–56.
4. Быков А.Ф. Арматура с шаровым затвором для гидравлических систем. М.: Машиностроение, 1971.
5. Зерщиков К.Ю., Семенов Ю.В. О критериях применимости металлополимерных подшипников скольжения в шаровых кранах // Трубопроводная арматура и оборудование, 2011, № 6 (57), с. 82–84.
6. Зерщиков К.Ю., Кузахметова Е.К. Металлополимерные подшипники для узлов вращения запорной арматуры // Трубопроводная арматура и оборудование, 2012, № 2 (59), с. 22–23.
7. А.И. Голубев, Л.А. Кондаков, В.В. Гордеев и др. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник. М.: Машиностроение, 1994.
8. Справочник по пластическим массам / под ред. Катаева В.М. М.: Химия, 1975.