

УДК 678

Исследование релаксации напряжений в уплотнительных узлах с полимерными и композитными уплотнителями, применяемыми в трубопроводной арматуре

К. Ю. ЗЕРЩИКОВ, канд. техн. наук
ООО "Константа-2", г. Волгоград, Россия

Исследована релаксация напряжений в уплотнениях различной формы из полимерных и композитных материалов, таких, как фторопласты, резины и резинофторопласты, с разной структурой (но при сопоставимых объемах, находящихся под нагрузкой) при разных напряженно-деформируемых состояниях. Показано, что в части поддержания герметичности сопряжения процесс релаксации не зависит от вида напряженно-деформируемого состояния, в котором находится уплотнение, и от деформационно-прочностных свойств материала. Отмечено, что наблюдаемые различия в интенсивности и величине релаксации не так важны с точки зрения работоспособности уплотнений в силу несопоставимости времени эксплуатации с временем релаксации, а также незначительности снижения конечного усилия по сравнению с начальным (примерно 30 % от начального значения).

Ключевые слова: уплотнение, полимерные материалы, композитные материалы, уплотнительный узел, напряженно-деформированное состояние, релаксация напряжений, интенсивность релаксации.

При рассмотрении герметичности соединений с полимерными уплотнениями необходимо учитывать такое важное свойство полимеров, как релаксация напряжений. Под релаксацией понимают снижение напряжений от начального уровня в образце или в элементе конструкции с течением времени при постоянной заранее заданной деформации. Релаксация напряжений присуща всем телам, однако в полимерных материалах скорость релаксации значительно выше, чем, например, в металлах. Известно, что скорость релаксации обусловлена структурными перестройками и перемещениями структурных единиц, происходящими в материале под действием напряжений [1].

Поскольку конформационный набор в полимерных материалах значительно шире, свойственные им скорости релаксации имеют разброс от малых до высоких значений.

Герметичность в соединении наступает только при наличии контактных напряжений, возникающих при сближении поверхностей тел [2, 3]. Напряжения в уплотнении снижаются с течением времени. Скорость их снижения сопоставима с временем испытаний и тем более с временем эксплуатации.

В результате за обозримое время напряжения могут снизиться до критических величин, при которых они оказываются ниже пороговых значений, обеспечивающих герметичность контакта.

Это обуславливает необходимость исследования влияния релаксации напряжений на герметичность контактных уплотнений.

Из отечественных публикаций только в работе [4] было уделено некоторое внимание релаксации напряжений в полимерных уплотнениях фланцевых соединений. Отмечено, что релаксация напряжений приводит к падению контактного напряжения в прокладках, которое снижается со временем по экспоненциальному закону. Падение напряжения на уплотнении тем больше, чем выше его исходное значение. Указывается, что это является негативным фактором, так как может привести к потере герметичности соединения. Однако исследовались уплотнения, которые не обладали эффектом самоуплотнения, и при одном виде напряженно-деформированного состояния — напряжении сжатия.

В разных типах трубопроводной арматуры в силу их конструктивных особенностей и специфики условий работы устанавливаются уплотнения разных форм, взаимодействующие с поверхностями разнообразных конфигураций, что приводит к возникновению в процессе эксплуатации напряжений и деформаций различных знаков и величины. Поэтому представляет интерес исследование релаксационных процессов в уплотнениях, находящихся в различных напряженно-деформированных состояниях, для того чтобы знать реальное поведение уплотнений в трубопроводной арматуре и, оценив влияние напряжений и деформаций на эти процессы, выработать приемы, гарантирующие герметичность соединений во времени.

В данной работе экспериментально исследована релаксация напряжений в уплотнениях круглого, трапециевидного, прямоугольного сечений,

Зерщиков Константин Юрьевич, генеральный директор.
E-mail: secret@constanta-2.ru

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2017 г.

© Зерщиков К. Ю., 2018

нагружаемых пуансонами различной формы для реализации напряженных состояний в уплотнениях, близких к имеющимся в реальных конструкциях. Нагружение проводили на машине Р-5 с помощью приспособления, имитирующего сжатие элемента уплотнения (рис. 1, 2). Точность измерения усилия составляла $\pm 0,1$ кг. Точность измерения деформации $\pm 0,1$ мм. Сборку, состоящую из двух образцов длиной по 3 см, ограниченных по торцам, сжимали до определенной деформации, что обуславливало достижение определенного усилия. Затем, зафиксировав деформацию, сжатие останавливали и наблюдали изменение усилия во времени. На рис. 1, а отображено уплотнение круглым кольцом в треугольной канавке. Очевидно, что здесь возникают напряжения сжатия, растяжения и сдвига. На рис. 1, б показан аналог уплотнения пробки шарового крана, в котором действуют напряжения сжатия и касательные напряжения. На рис. 1, в изображено классическое

уплотнение прямоугольной прокладкой, в котором действуют только сжимающие напряжения, на рис. 1, г — аналог уплотнения кольцом круглого сечения в прямоугольной канавке, в котором возникают напряжения сжатия и растяжения.

Поскольку диапазон рабочих давлений, а значит, и напряжений в уплотнениях, а также температур эксплуатации достаточно широк, для изготовления уплотнений используют материалы с различными физико-механическими характеристиками. Одним из основных свойств, характеризующих герметизирующие способности материалов для уплотнений, является твердость [5]. Поэтому в экспериментах использовали материалы с разной твердостью: по Шору от 70 А до 70 Д. Таким образом, рассматриваемые схемы охватывают практически все известные варианты уплотнительных узлов с использованием широкого диапазона материалов, применяемых в трубопроводной аппаратуре.

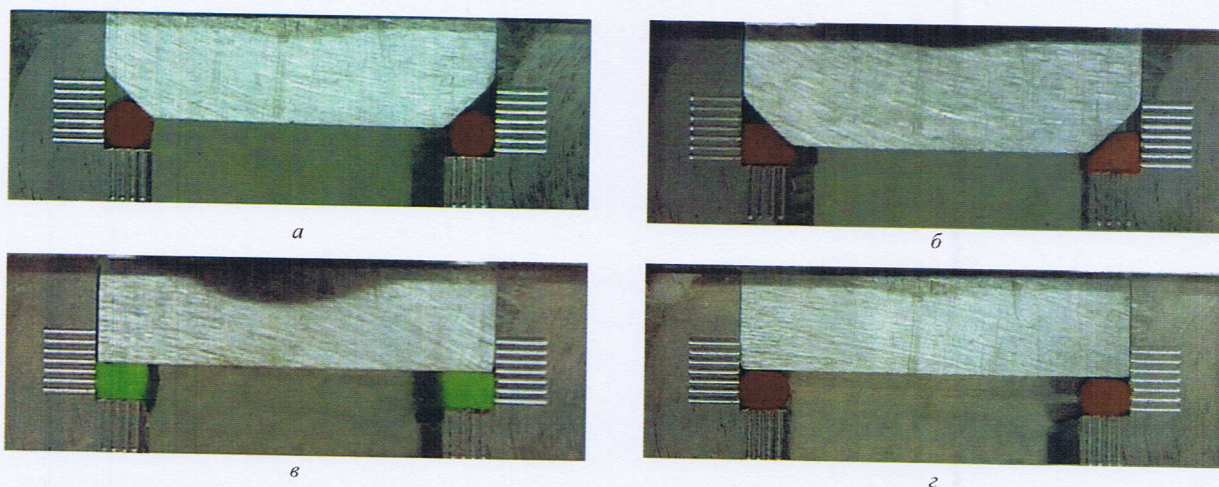


Рис. 1. Формы исследуемых уплотнений и пуансонов при сжатии резиновых уплотнителей с твердостью по Шору 70 А

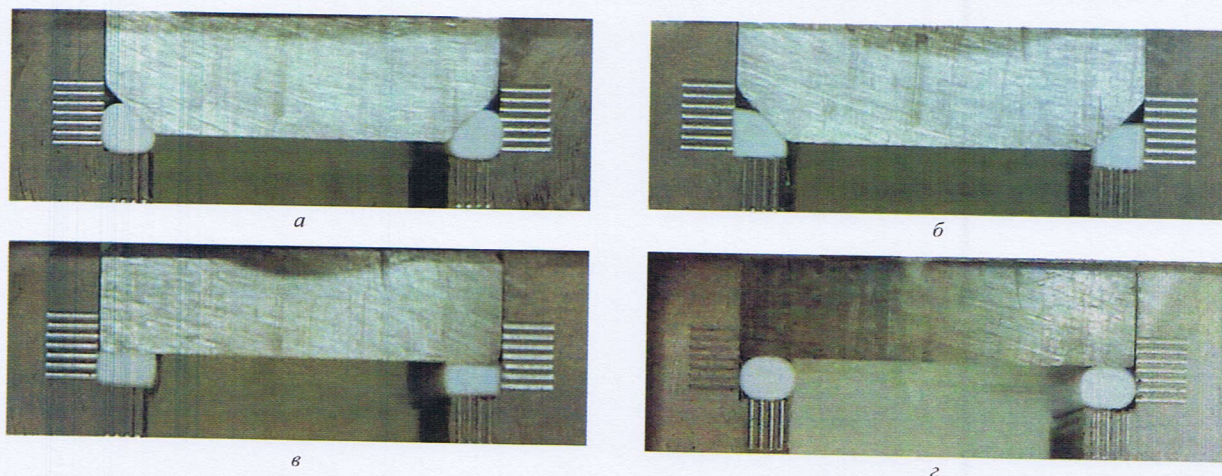


Рис. 2. Характер деформации уплотнений различной формы из фторопласта Ф-4ПН с твердостью по Шору 50 Д под действием пуансонов разной формы

Отметим важное свойство рассматриваемых уплотнительных узлов. Как видно из сравнения рис. 1 и 2, характер деформации уплотнений, а значит, и вид напряженно-деформированного состояния не зависят от характеристик материала. Поскольку деформации идентичны (что видно на фото), виды и знаки напряжений будут одинаковы. При этом они, очевидно, различны по величине, что определяется разницей свойств материалов.

Важно, и это зафиксировано в эксперименте, что площадь контакта образца с контртелом не меняется со временем, так как не изменяется величина деформации образца, от которой она напрямую зависит, а значит для заданной деформации падение напряжений в образце и контактного давления на площадке пропорционально падению усилия. Это позволяет на первом этапе исследовать изменение усилия во времени. На рис. 3 изображены кривые релаксации при разных начальных значениях усилия во фторопластовых образцах твердостью по Шору 50 Д, сжатых по схеме нагружения рис. 2, *з*, и в резиновых стержнях твердостью по Шору 70 А, нагруженных по схеме рис. 1, *а*. Кривые релаксации в других исследованных материалах, обладающих иными значениями твердости (полиуретан — 92 ед по Шор А; фторопласт Ф-40 — 70 ед по Шор Д), при разных схемах нагружения и различных начальных усилиях аналогичны показанным. Как видно, в сжатых образцах-аналогах уплотнений наблюдается типичный при исследовании релаксации напряжений ход кривых.

При любом начальном усилии вначале наблюдается резкое его падение, величина которого со временем стабилизируется на некотором уровне, характерном для каждого начального значения усилия сжатия. Как и следовало ожидать, интенсивность релаксации снижается с течением времени, т. е. интенсивность перераспределения напряжений снижается по мере удаления от начального состояния. Во всех экспериментах, отличающихся величиной и распределением напряжений в уплотнении, твердостью материала уплотнения, наблюдаются одинаковые характер кривых релаксации и интенсивность падения усилия. Это означает, что идентичны внутрискруктурные процессы, приводящие к падению напряжений во времени: перераспределение напряжений от более напряженных связей к менее напряженным за счет перемещений различных структурных единиц полимеров. Таким образом, процесс релаксации

напряжений в уплотнениях протекает в соответствии с теми же закономерностями, присущими полимерным материалам.

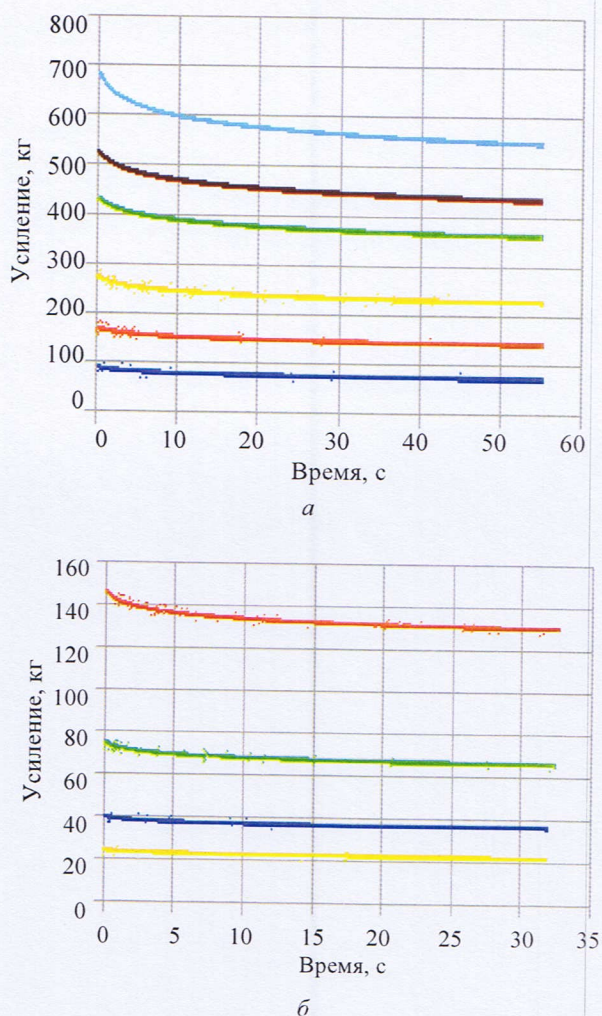


Рис. 3. Кривые релаксации усилий при разных начальных усилиях:

а — фторопластовое уплотнение, сжатое по схеме нагружения рис. 2, *з*; *б* — резиновое уплотнение, сжатое по схеме рис. 1, *а*

С увеличением начального усилия (напряжения) общая величина падения усилия на образце или контактного напряжения в соединении растет, причем абсолютная величина снижения усилия может достигать 25 % (рис. 4). Понятно, что общая величина релаксации усилия за более длительный период наблюдения будет выше, однако снижение темпа релаксации во времени позволяет утверждать, что общее падение усилия при неизменной деформации за время, сопоставимое с временем эксплуатации, не превысит 30 % величины начального усилия.

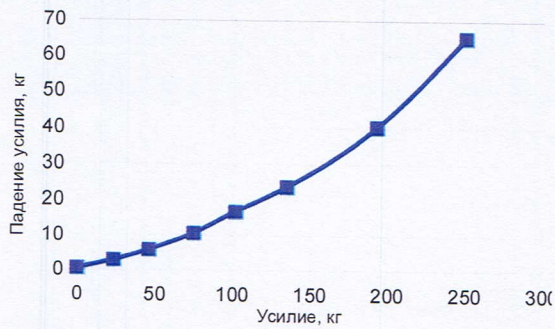


Рис. 4. Зависимость величины падения усилия в резиновом кольце во фторопластовой оболочке (РФК) в результате релаксации напряжений через 3 мин после приложения усилия от величины начального усилия сжатия конусным пуансоном (схема нагружения с рис. 1, а)

Однако относительная величина, равная отношению разницы усилий за определенный интервал времени к начальному усилию, названная автором коэффициентом релаксации и характеризующая интенсивность протекания процесса, практически одинакова для всех исследованных условий. Рис. 4 это наглядно иллюстрирует: угол наклона кривой мало изменяется с ростом начального усилия. Расчет коэффициента релаксации производится по формуле

$$k_{10} = (P_0 - P_{10}) / P_0 \quad (\text{коэффициент релаксации за 10 с}), \quad (1)$$

где P_0 — усилие в начальный момент времени;
 P_{10} — усилие через 10 с от начала релаксации.

Как показывает рис. 5, коэффициент релаксации практически инвариантен относительно начального усилия, хотя наблюдаются некоторые его колебания относительно среднего значения, объясняемые невозможностью испытать образцы со строго одинаковыми характеристиками. Это означает, что перестройка структуры материала под действием напряжений происходит при любом их начальном значении и величина или объем происходящих при этом изменений пропорциональны приложенному усилию, т. е. введенной в материал энергии.

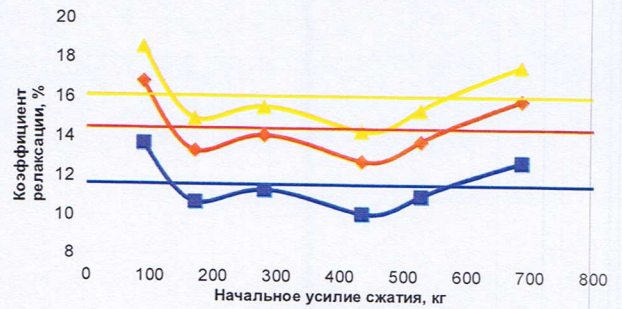


Рис. 5. Зависимость коэффициента релаксации в образцах из фторопласта 4ПН от начального усилия при испытаниях по схеме с рис. 1, г:

■ — коэффициент релаксации за 10 с; ◆ — коэффициент релаксации за 20 с; ▲ — коэффициент релаксации за 30 с

С ростом времени релаксации коэффициент релаксации ожидаемо увеличивается ($k_{30} > k_{20} > k_{10}$), что показывает увеличение релаксируемого усилия во времени. В таблице представлены коэффициенты релаксации, полученные усреднением при разных начальных усилиях для каждой схемы нагружения и материала уплотнения.

Видно, что в исследуемых материалах отсутствует корреляция между напряженно-деформированным состоянием и коэффициентом релаксации. На основании этих результатов можно заключить, что падение усилия сжатия является универсальным для всех уплотнений. С практической точки зрения это позволяет, зная начальное усилие и коэффициент релаксации, оценить величину снижения напряжения в материале, а значит, и величину контактного давления в соединении. Интенсивность релаксации примерно одинакова для различных материалов и схем нагружения. Поскольку время эксплуатации несравнимо больше времени релаксации, очевидно, что в уплотнении будут действовать равновесные напряжения, т. е. напряжения, установившиеся после окончания релаксации, когда структурные элементы займут положения, близкие к равновесным.

На рис. 6 представлены кривые релаксации усилия в образцах из фторопласта Ф-4ПН при разных напряженно-деформированных состояниях, но при примерно одинаковых начальных усилиях.

Значения средних коэффициентов релаксации k_{10}

Схема нагружения	Резина 70, Шор А	Полиуретан 92, Шор А	РФК	Ф-4 55, Шор Д	Ф-40 70, Шор Д
Рис. 1, а	7,9	—	10,3	11,9	9,3
Рис. 1, б	8,4	10,5	—	10,25	—
Рис. 1, в	11,25	8,8	—	11,6	—
Рис. 1, г	9,5	—	13,1	13,1	—

Видно, что напряженно-деформированное состояние не оказывает существенного влияния на протекающие конформационные переходы, обуславливающие явление релаксации. Следовательно, независимо от схемы и условий герметизации стыков релаксация напряжений в уплотнителях будет проходить однотипно, что подтверждает ранее установленный факт: интенсивность релаксации не зависит от характера напряженно-деформированного состояния. Другими словами, напряженно-деформированное состояние не изменяется при релаксации напряжений.

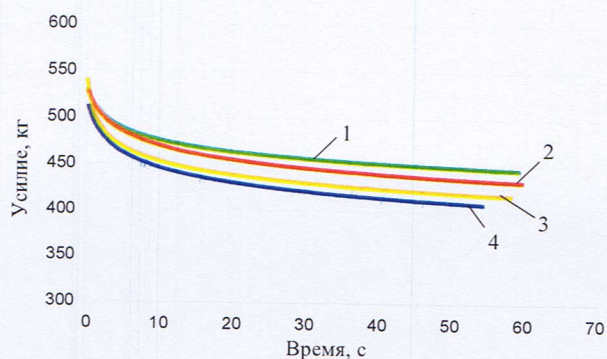


Рис. 6. Временные зависимости релаксации усилия в уплотнителях из фторопласта 4, находящихся в различных напряженных состояниях:

- 1 — седловое уплотнение конусным пуансоном (см. рис. 1, б);
- 2 — плоское уплотнение плоским пуансоном (см. рис. 1, в);
- 3 — круглое уплотнение конусным пуансоном (см. рис. 1, а);
- 4 — круглое уплотнение плоским пуансоном (см. рис. 1, г)

На рис. 7 представлены кривые релаксации однотипных образцов из разных материалов, сжатых в одинаковых условиях, в которых реализовано одинаковое напряженно-деформированное состояние. Легко заметить, что ход и характер протекания процесса релаксации не изменяются у разных материалов, имеющих различную твердость. Материалы отличались по твердости, так как эта характеристика — одна из основных, отвечающих за герметичность уплотнения, что важно для последующего изложения. Очевидное различие в интенсивности релаксационных процессов объясняется различием структуры исследуемых материалов, однако не является принципиальным для рассматриваемых автором явлений, поскольку порядок величин релаксации не может считаться опреде-

ляющим с точки зрения конечного состояния материала уплотнения и влияния на герметичность.

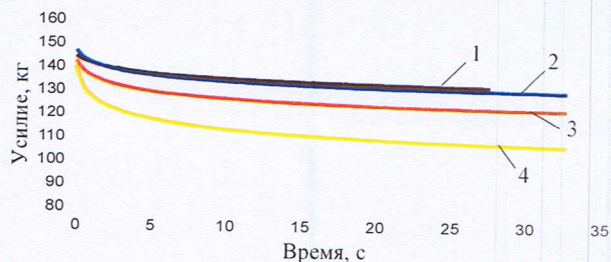


Рис. 7. Релаксация в уплотнениях круглого сечения, сжатых по схеме с рис. 1, а, различной твердости при одинаковом начальном усилии:

- 1 — Ф-40 твердостью по Шору 75 Д; 2 — резина твердостью по Шору 70 А; 3 — РФК с резиновым сердечником твердостью по Шору 70 А; 4 — Ф-4 твердостью по Шору 55 Д

Исследование влияния шероховатости уплотняемой металлической поверхности на релаксацию напряжений в прокладках между фланцами, проведенное в работе [6], показало, что в пределах 4–8 классов шероховатости фланцев не наблюдается изменения процесса релаксации в комбинированных прокладках, состоящих из фторопластовой оболочки, гофрированного металлического вкладыша и резиновых прокладок. Поэтому соответствующих специальных исследований не проводили, допустив отсутствие зависимости процесса релаксации от шероховатости сопрягаемых поверхностей. При этом надо понимать, что при анализе герметичности соединения нельзя пренебрегать данным фактором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуль В. Е., Кулезнев В. Н. Структура и механические свойства полимеров. — М.: Лабиринт, 1994. — 367 с.
2. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / под ред. Голубева А. И., Кондакова Л. А. — М.: Машиностроение, 1986. — 448 с.
3. Майер Э. Торцовые уплотнения — М.: Машиностроение, 1978. — 288 с.
4. Бабкин В. Т., Зайченко А. А., Александров В. В. и др. Герметичность неподвижных соединений гидравлических систем. — М.: Машиностроение, 1977. — 120 с.
5. Зершиков К. Ю., Семенов Ю. В. и др. Полимерные уплотнения для экстремальных условий эксплуатации // Трубопроводная арматура и оборудование. 2007. № 3 (30). С. 55, 56.
6. Аврущенко Б. Х. Резиновые уплотнители. — Л.: Химия, 1978. — 136 с.

Investigation of stress relaxation in sealing units with polymer or composite sealings used in pipeline valves

K. Yu. ZERSCHIKOV

Constanta-2 Ltd, Volgograd, Russia

Influence of stress relaxation of sealings made from polymer or composite materials such as fluoroplastics, rubbers and rubber-fluoroplastics at different stress-strained states is investigated. It is shown that relaxation process donot depends on stress-strained state of sealing and physical and mechanical properties of sealing material. It is noted that observed distinctions in intensity and size of relaxation arenot so important with point of view of availability of sealings on account of incomparision of exploitation time with relaxation time as well as insignificant reduction of finite effort in comparison with initial level.

Keywords: sealings, polymeric materials, composite materials, sealing unit, stress-strained state, stress relaxation, relaxation intensity.