

Надежность разъемных герметичных соединений:

проблемы и решения

■ А. П. Епишов, Президент НП «Уплотнительная техника»

Надежность любой технологической системы, состоящей из совокупности элементов (составляющих системы), определяется надежностью каждого элемента. Рассмотрим в качестве примера автомобиль, представляющий совокупность десятков функциональных систем, каждая из которых состоит из отдельных устройств и сотен элементов. Практически любая система автомобиля может рассматриваться как критическая, с точки зрения надежности. Для автомобиля надежность может определяться продолжительностью его безотказной работы. Но поскольку автомобилем управляет человек, ключевым фактором является надежность систем, определяющих безопасность. Если во время дождя перестанут работать стеклоочистители, или в темное время суток погаснут фонари освещения, или внезапно лопнет шина, или выйдет из строя тормозной цилиндр, или... Можно было бы продолжить этот перечень возможных отказов, важно понять главное — сотни узлов и тысячи элементов являются критическими, с точки зрения надежности автомобиля.

Надежность любой технологической системы снижается адекватно длительности ее эксплуатации. Понятно, что покупая десятилетний автомобиль, мы должны отдавать себе отчет в том, что его надежность несоизмеримо более низкая, нежели надежность нового автомобиля. Справедливости ради следует отметить, что новые автомобили отсталых производителей часто не обладают надежностью даже десятилетних автомобилей ведущих производителей. Разумеется, при условии их нормальной и бережной эксплуатации. В то же время даже изначально самый надежный автомобиль можно «убить» очень быстро, если его варварски эксплуатировать. Таким образом на примере автомобиля, мы подошли к констатации важной закономерности: надежность любого технического устройства определяется его конструкционной (заданной при изготовлении) и эксплуатационной надежностью. Если вам нужно перевозить людей, то вы покупаете автобус, а не тягач-лесовоз. Если вы умеете считать деньги и цените свой труд, для вас не составит труда периодически проводить тех-

ническое обслуживание вашего автомобиля и бережно его эксплуатировать.

Такое длительное вступление к основной теме объясняется простой причиной — все, что было сказано о надежности автомобиля, в полной мере может быть отнесено к разъемному герметичному соединению (РГС). Во-первых, следует всегда рассматривать не только уплотнение (прокладку, сальник и т. п.), а систему — РГС, состоящую из совокупности элементов (как правило): фланцы, шпильки, гайки, шайбы и уплотнитель. Для классического сальникового узла, это, соответственно, корпус с сальниковой камерой, грундбукса, шпильки, гайки, шайбы, и уплотнитель (набивка или формованные кольца). Во-вторых, на надежность РГС влияет не только уплотнитель, но также и все другие элементы. Иногда специалисты, осуществляющие ремонт РГС, считают достаточным лишь заменить уплотнитель. При этом они игнорируют необходимость осмотра и контроля состояния других элементов. Хотя довольно часто состояние именно этих элементов определяет надежность РГС. Фланцы могут быть сильно загрязнены или иметь повреждение, или могут быть непараллельными. Тщательного осмотра требует и состояние резьбы на крепежных элементах. В конечном итоге, выбор параметров конкретного уплотнителя всегда должен определяться состоянием РГС. Особенно важный параметр для прокладки — толщина уплотнителя. Например, во фланцевом соединении, с одной стороны, всегда желательно иметь более тонкую прокладку. С другой стороны, при перекосах фланцев и в условиях циклических динамических нагрузок толщина прокладки должна «перекрывать» перекосы и обеспечить запас сил упругости. В-третьих, по мнению ведущих технических экспертов, надежность РГС в большей степени определяется не конструкцией уплотнителя, а условиями сборки РГС. Разумеется, выбор уплотнителя, прежде всего, должен осуществляться с учетом рабочих условий. При этом следует принимать во внимание действующие отраслевые нормативные документы и инструкции по монтажу производителя уплотнения. Как показывает опыт, в

75 % случаев разгерметизации РГС, причиной является неправильная сборка соединения.

Казалось бы, чего проще собрать РГС. Наживил шпильки, бросил прокладку между фланцев, затянул гайки — и все дела. Все было бы хорошо, если бы не один простой вопрос. Какое усилие передано на прокладку, какое контактное давление передано на уплотняемые поверхности? В какой мере эти параметры соотносятся с гидродинамическим усилием от действия рабочей среды, стремящимся «оторвать» фланцы от прокладки? Учитывались ли возможные тепловые деформации фланцев, крепежных элементов и уплотнителя? Принималось ли во внимание состояние резьбовых соединений и торцевых поверхностей гаек и шайб?

Начнем с самого первого, ключевого вопроса. Как определить реальное усилие на уплотняемых поверхностях? Существует, как минимум, два традиционных способа определения усилия на прокладке. Первый — использование динамометрического ключа, второй — измерение деформации прокладки. С точки зрения инженерной практики, второй способ более надежный. В то же время точно замерить деформацию прокладки не всегда представляется возможным. Эта процедура требует затрат времени и терпения. В этом случае сначала фланцевое соединение собирают без прокладки и замеряют зазор между фланцами (методом расчета средней арифметической величины по результатам четырех или шести замеров по периметру разъема). Затем, принимая во внимание исходную толщину прокладки в процессе затяжки соединения, вновь замеряют зазор. Можно использовать специальные мерные плитки. В ответственных соединениях расчетным методом определяют нужный зазор и при сборке устанавливают по периметру разъема специальные плитки-ограничители сжатия.

Но сама величина деформации нам ничего не дает. Нам необходимы данные разработчика или изготовителя, а именно условная диаграмма сжатия прокладки, т. е. зависимость деформации от напряжения сжатия. Однако даже ведущие мировые производи-

тели уплотнений таких данных не дают. Как правило, они лишь указывают сжимаемость уплотнительного материала (максимальную деформацию при нагрузке 35 МПа), и предел прочности на сжатие. Почему разработчики не дают пользователям необходимых данные. Это непростой вопрос. Дело в том, что даже для одного материала разброс данных в условных диаграммах сжатия порой имеет весьма значительный характер. Современные материалы являются, как правило, анизотропными. Кроме всего прочего, это обычно композиты, и обеспечить однородность их физико-механических свойств не всегда представляется технически возможным. В любом случае, у конечных пользователей всегда есть возможность проконсультироваться с разработчиками уплотнения.

Второй путь определения усилия на прокладке — использование динамометрического ключа. В инструкциях по сборке РГС ответственные поставщики, как правило, приводят известную формулу для расчета момента на ключе ($M_{кн}$). Здесь важно отметить одну деталь. В нормах расчета на прочность приводятся данные по двум коэффициентам. Один в формуле для крутящего момента, действующего на шпильку, второй — в формуле для определения момента на ключе при затяжке гаек. Нас интересует второй коэффициент, иногда его называют обобщенным коэффициентом трения. На самом деле коэффициент трения в резьбовых соединениях значительно изменяется в зависимости от наличия покрытия болтов и гаек и применяемых смазочных материалов. Более того, в точном расчете используются два коэффициента: трения в резьбе и трения на торцевой поверхности. Например, использование смазки в виде машинного масла с добавкой 20 % дисульфида молибдена снижает коэффициент трения более чем в два раза. Таким образом определить относительно точно обобщенный коэффициент трения можно лишь экспериментальным путем, сжимая специальную тестовую шайбу. Другой путь — сравнение данных условной диаграммы сжатия прокладки с деформацией конкретной прокладки. По деформации мы определяем усилие и по усилию расчетным путем определяем коэффициент трения. В заключение заметим, что по этой теме написано немало научных работ, и все они убеждают нас в том, что погрешности при расчете $M_{кн}$ могут быть весьма значительными. И что же остается делать «бедному крестьянину», простите, слесарю-ремонтнику. Ответ будет банальным: смотрите рекомендации отраслевых нормативных документов, данные разработчиков уплотнений, техническую литературу, одним словом, накапливайте свой бесценный опыт. Иногда методом проб и ошибок.

Что касается других методов сборки РГС (горячая и холодная вытяжка шпилек и др.), то они, как правило, применяются как регламентированные методы сборки для сложных и ответственных технических устройств. Эти методы требуют наличия специального оборудования и предполагают экономическую и технологическую целесообразность их использования.

Итак, мы достаточно подробно описали проблематику обеспечения заданного усилия при сборке РГС. Как правило, более чем в 75 % случаев разгерметизации РГС причиной является недостаточная затяжка крепежных элементов. Однако это лишь один, но наиболее важный аспект. Также следует рассматривать такой фактор как методика затяжки РГС. Прокладка должна обжиматься равномерно и поэтапно по периметру РГС. После выдержки определенного времени (несколько часов) требуется дополнительная подтяжка. Есть еще целый ряд факторов. Например, у нас в России некоторые «умельцы» любят покрыть прокладку смазкой «чтобы не пригорала». Этого делать категорически нельзя, так как при сжатии прокладки она будет стремиться «скользить» в радиальном направлении. Самое пристальное внимание следует уделять аккуратной установке прокладки в разъем. Некоторые прокладки, например графитовые, часто повреждаются при установке, и эти повреждения являются причиной разгерметизации, особенно при наличии циклических нагрузок.

В заключение приведем некоторые общие представления о надежности РГС. С точки зрения основ термодинамики, затянутое РГС — это система, выведенная из состояния термодинамического равновесия. Эта система стремится вернуться в исходное состояние. Во всех элементах РГС происходит процесс релаксации напряжений. За счет роста деформаций ползучести имеет место потеря упругой энергии. Этот процесс усугубляется при наличии нестационарных режимов работы (циклические динамические и тепловые нагрузки). Правильная затяжка РГС, с этой точки зрения, — это обеспечение в элементах РГС, в первую очередь в прокладке, заданного уровня упругой энергии. Эта энергия будет обеспечивать в процессе работы РГС контактные напряжения на уплотняемой поверхности, существенно превышающие давление уплотняемой среды. Чем выше проницательная способность рабочей среды, тем выше должна быть величина упругой энергии. Иными словами, ключевые рекомендации будут следующими: чем ответственнее РГС (температура и давление среды, наличие циклических нагрузок), тем более прочной должна быть прокладка.

Санкт-Петербург, май 2009 года

Сталь

То, что будет изложено в этой статье, должно быть известно выпускникам технических вузов, особенно машиностроительных, металлургических и сварочных специальностей. Однако учитывая то, что в последние десятилетия кадровый процесс динамизировался, и в конструкторские, производственные и особенно маркетинговые службы пришли специалисты, не обремененные соответствующими знаниями, то вопрос металла для арматуры становится актуальным. Особенно это касается маркетологов, обучающихся различным маркетинговым приемам и практически мало знающих о товаре, который имеет свои специфические особенности, зачастую не позволяющие применять общие методы классического маркетинга и требующие частного подхода к быстро меняющейся рыночной обстановке.

Еще хуже обстоит дело с прогнозированием перспективы продукта, путей его развития. Здесь приходится идти на серьезную конфронтацию с производителями, в чьих природных интересах выпускать освоенный, обеспеченный оборудованием, технологией и персоналом продукт.

Бывалый арматурщик скажет, что не о чем здесь раздумывать: из чего трубопровод, из такого же металла и арматура. И будет в основном прав. Но между арматурой и трубопроводом есть различия по функциям, назначению, форме и т. д. За неполадки с арматурой несет ответственность арматурщик, а за разрушение трубопровода — те, кто связан с ним: проектировщики, изготовители, эксплуатационники и т. д.

Начиная писать эту статью, я значительное время потратил на то, чтобы подобрать для нее название. «Госпожа арматура» сомнений не вызвала, а вот с первой частью названия были проблемы. В голове крутились четыре варианта — чугун, металл, сталь, сплав. С чугуном связано мое первое серьезное знакомство с металлургией.

Году в 1956, в мое пятилетие, вечером отец привел меня в чугунолитейный цех (чугунку) смотреть разливку чугуна. Потом я достаточно видел разливку сталей, но первый разлив чугуна произвел неизгладимое впечатление. Чугун содержит углерода свыше 2,14 %, а сталь до 2,14 %. Ослепительные белые искры, сгорающие не долетая до пола, завораживают. Старший мастер плавильного участка пытался мне рассказать, как работает вагранка, но так как я уже видел в киножурнале «Новости дня» огромную доменную печь,

для госпожи арматуры

■ С. К. Васильев, главный инженер компании «Комбит — Арматура», Москва

я сказал ему, что это что-то маленькое и не то. Долгое время у меня был подарок отца — маленькая чугунная копия памятнику Юрию Долгорукому. Однажды копия упала, и на постаменте остались только четыре копыта, а туловище коня вместе с Долгоруковым оказались отдельно, о чем я очень сожалел.

Итак, чугунная арматура прочная, точно повторяющая контуры литейной формы из-за повышенной жидкотекучести чугуна, но очень хрупкая. Чугунная арматура, безо всякого сомнения, — порождение литых чугунных трубопроводов, но сейчас, в связи с заменой металлических трубопроводов низкого давления на неметаллические, она уходит в историю.

Огромный период развития нашей страны связан с чугуном, из которого сделано большое количество оборудования, в том числе и арматуры, работающей в неударном режиме. Она, естественно, заслуживает доброй памяти, но применение ее в будущем очень ограничено. Нынешний спад производства несколько продлит ей жизнь, но ненадолго. Кстати, в атомных энергетических установках (АЭУ) применение чугунной арматуры запрещено.

Написав слово «металл», я, в общем-то, лукавил, потому что самый распространенный металл на Земле — это железо, и из него возможно в перспективе изготовление арматуры, но механические и коррозионные свойства технически чистого железа крайне неудовлетворительны. Появление же наночистого железа, где на миллиард атомов приходится один атом примеси или на миллион тонн железа один килограмм примеси, — маловероятно в ближайшее время. Работать в этом направлении необходимо, так как очищенное от примесей наножелезо будет иметь совсем другие свойства, чем технически чистое. Терминология в металловедении — вещь до конца не устоявшаяся: очень сложная наука, множество различных школ. Согласно некоторым из них, сплавом принято считать совокупность элементов, где железа или нет совсем, или менее 50 %. Поэтому все основные детали арматуры изготавливаются из сталей, содержащих более 50 % железа. Сплавы применяются в арматуре в небольших количествах в отдельных элементах арматуры, находящихся в интенсивно нагруженных состояниях: уплотнительные поверхности седел задвижек (колмоно, стеллиты), пружины затворов при высоких температурах (нимоники).

Уплотнительные поверхности задвижек должны изготавливаться из разных сплавов, наплавленных разными способами, причем твердость уплотнительных поверхностей седла должна быть тверже затвора на 3–6 HRC. Увлекаясь коррозионными свойствами шток и применяя для них сталь (сплав) другого класса, необходимо обратить внимание на состояние поверхностей крышки, закрытое сальником. Одним словом, переходя на шток из коррозионностойкой стали, в арматуре из углеродистой стали надо менять и крышку, а заодно и корпус...

Итак, остается сталь, которую вношу в заголовки статьи.

Человечество, усиливая различные свойства железа за свою «железную» историю создало великое множество сталей, но получается, что нет ни одной хорошей, удовлетворяющей всем требованиям, так что остановимся только на нескольких, памятуя о том, что специально (только для арматуры) стали производиться не будут, хотя арматура требует применения более качественной стали, чем трубопровод.

Сталь 20 — низкоуглеродистая.

Сталь 09Г2СА — кремнемарганцовистая.

Сталь 15Х1М1ФЛ — хромомолибденованадиевая.

Сталь 12Х18Н10Т — хромоникелевая.

Химический состав ст. 20, если смотреть по обозначению, состоит из углерода 0,17–0,24 %, а остальное железо, но кроме этого в ней присутствуют вредные примеси: сера и фосфор до 0,035 %, влияющие на хладно- и красноломкость, а также марганец и кремний до 1 % и из-за чего в обозначении стали не указываются. Марганец и кремний повышают прочность стали и стабилизируют вязкость. Малое содержание углерода позволяет иметь хорошие характеристики по свариваемости, в большинстве случаев не требующей подогрева и последующей термообработки. Марганец и кремний попадают в сталь из-за особенностей металлургического процесса, не специально. А если осознанно — то получают специальные кремнемарганцовистые стали, представителем которых является сталь 09Г2СА, содержащая до 2 % марганца (Г) и до 1 % кремния (С). Буква «А» в конце обозначения, говорит о том, что эта сталь улучшенная, т. е. в ней серы и фосфора должно быть не более 0,025 %. Достигается это дополнительными способами и делает сталь дороже. При легировании стали марганцем и кремнием суммарно в пределах 3 %

повышается прочность до 30 % по сравнению со ст. 20 и сохраняется вязкость. Что позволяет эту сталь использовать при температуре окружающей среды до –60 °С и температуре рабочей среды до 400 °С?

Чтобы использовать сталь при более высоких температурах — до 560 °С углеродистую сталь необходимо легировать хромом, молибденом и ванадием. Типичным представителем жаропрочных сталей является сталь 12Х1МФ, но сейчас поговорим о стали 15Х1М1ФЛ. Эта сталь имеет повышенные механические свойства при высоких температурах по сравнению с 12Х1МФ и была разработана ЦНИИТМАШем (г. Москва) и внедрена на Венюковском арматурном заводе для корпусных деталей арматуры. В обиходе ее называют ЦВ, что означает ЦНИИТМАШ–ВАЗ. В конце обозначения стали стоит буква «Л», обозначающая способ получения заготовок — литье. Также есть ВД (вакуумно-дуговой переплав), Ш (электрошлаковая выплавка). Если в конце обозначения никакой буквы не стоит, то сталь получена обработкой давлением (ковкой, прокаткой, штамповкой, прессованием). Небольшое легирование хромом (Х) и молибденом (М) позволяет улучшить характеристики длительной прочности и ползучести углеродистой стали при высокой температуре, что позволяет иметь ресурс корпусных деталей до 150–200 тыс. часов, еще более увеличить уровень механических свойств и ресурс позволяет незначительная добавка до 0,4 % ванадия (Ф). Хочется провозгласить маленькую оду этому металлу. Его добавка в металл жаропрочной стали позволило отечественной энергетике без значительной реконструкции проработать с 70-х годов прошлого века по настоящее время.

Все вышеперечисленные стали подвержены общей коррозии в обычных средах. Этот показатель увеличивается при агрессивных средах.

Для работы в условиях, когда углеродистая или малолегированная сталь активно корродирует, применяются нержавеющие хромоникелевые стали, типа 12Х18Н10Т. Эта легированная сталь содержит до 30 % легирующих элементов, остальное более 70 % составляет железо. Увеличение в стали никеля до 18 % улучшает ее коррозионностойкость. Возникает вопрос, почему железо в нержавеющей стали не корродирует (ржавеет). Все дело в том, что железо благодаря значительному легированию стабилизируется в иной кристаллической форме — более плотной.

Эта плотная структура придает сталям необыкновенные свойства — достаточную вязкость при глубоком холоде $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и прочность значительно более высокую, при температурах до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вместе с положительными качествами, которые придают хром и никель этой стали, приносят и недостаток — особый вид коррозии — межкристаллитной. Этот вид коррозии проходит по границам отдельных кристаллов и металл подверженный этому виду коррозии разрушается при незначительных нагрузках. Две основные причины этого — наличие углерода и термическое воздействие.

Гимн титану. Снизить вероятность межкристаллитной коррозии позволяют небольшие до 1 % добавки титана в сталь, которые связывают углерод, не позволяя ему добраться в опасном состоянии до границ зерен. Нижняя граница содержания титана в титаносодержащих сталях, связана формулой с содержанием углерода в стали.

В этой статье я постарался избежать терминов: феррит, перлит, аустенит, сорбит, трустит, мартенсит, бейнит, эвтектика, твердый раствор, карбид и многих других.

Конечно, хотелось, чтобы обеспечив химический состав стали получить все необходимые характеристики. Но кроме химсостава есть еще и другие факторы, влияющие на конечный результат. Химический состав с большим разбросом содержания элементов практически включает в себя несколько сталей, так как свойства стали при химсоставе на нижнем пределе значительно отличаются от свойств химсостава на верхнем пределе. Можно надеяться, что в металлургию придут нанотехнологии, которые расширят возможности решения этих задач.

И еще. Арматура и трубопроводы могут изготавливаться из разных сталей, но обязательным условием должен быть один класс стали контактирующих деталей. Фланцы плохо или совсем не работают, если их коэффициенты линейного расширения различны. При определенных условиях может возникнуть электрохимическая коррозия, например шток–крышка. Шпильки и гайки фланцевого соединения должна изготавливаться из разных марок сталей (в большинстве случаев шпильки прочнее, но класс одинаковый).

Итак, мы рассмотрели основные типы стали, используемые для производства трубопроводной арматуры на предприятиях России и стран СНГ. В следующей статье мы постараемся рассказать о сталях, применяемых для производства арматуры в США, а также привести таблицу аналогов и сделать сравнительных анализ сталей.

Библиография:

А. П. Гуляев «Металловедение» Москва, «Металлургия» 1977 г.

Москва, май 2009 года