

Статья посвящена анализу результатов испытаний арматуры, предназначенной для нефтепромысловой оффшорной платформы Шах Дениз в Каспийском море и применяемой в комплексных системах защиты от давления (HIPPS). Арматура диаметром 12 дюймов на давление 10,000 фунтов на кв.дюйм, изготовленная в соответствии с требованиями стандарта API 6A, должна закрываться в течение 1 секунды при помощи гидравлического привода. При испытании этой арматуры возникли некоторые проблемы: при испытании на стойкость к износу при перепаде давления 540 бар в шаровых кранах происходило задиранье между шаром и седлом, покрытым карбидом вольфрама, тогда как задвижки при гидравлических испытаниях корпуса из литой супердуплексной стали A590 сорт 5A, подвергались пластической деформации. В статье проанализированы причины этих отказов, а также описываются дополнительные испытания и исследования по оценке арматуры и уроки, которые извлекли из этого опыта.

Опыт создания шарового крана и задвижки на высокие параметры по API 6A

Бруно Мартин и Джоф Олнат, фирма Technip France,
Эдвин Смит и Франк Зезула, фирма BP, UK

◆ Что такое система HIPPS

Фонтанные линии от скважины рассчитаны на давление 685 бар. Дроссельные клапаны снижают давление потока до 152 бар, тогда как расчетное давление технологического оборудования, установленного на нисходящем потоке, составляет 185 бар. Чтобы избежать использования редуцирующих клапанов с полным расходом на оборудовании, рассчитанным на 185 бар, само оборудование и сеть трубопроводов укомплектованы комплексной системой защиты от давления (HIPPS). Она содержит четыре комплекта арматуры (по 1 шаровому крану и 1 задвижке на комплект).

Арматура диаметром 12 дюймов на давление 10,000 фунтов на кв.дюйм, изготовленная в соответствии с требованиями стандарта API 6A, должна закрываться в течение 1 секунды при помощи гидравлического привода.

Система HIPPS с расчетным давлением 185 бар для промысловой нефти и газа содержит:

- 1-ую ступень с заданным значением минимум 160 бар;
- HIPPS с заданным значением 168 бар.

Время срабатывания комплексной системы защиты от давления (HIPPS) должно быть менее 2,5 секунд.

◆ Шаровой кран для системы HIPPS

Это 12 дюймовый шаровой кран с верхним разъемом и пробкой в опорах. Корпус изготовлен из углеродистой стали с покрытием инконелом 625, шар и седло – из супердуплексной стали по стандарту ASTM A182 F55, покрытие контактирующих со средой частей – карбид вольфрама, толщиной 150 микрон. Привод гидравлический, с пружинами возврата. Из-за критических рабочих условий этой арматуры и подтверждения эксплуатационных характе-

ристик, необходимо провести испытание на стойкость к износу. В результате обсуждений с изготовителем арматуры были определены следующие условия испытаний:

- испытание следует провести при совершении циклов из положения «закрыто» в положение «открыто» под действием пружины привода при перепаде давления 540 бар;
- испытательная среда – вода;
- время хода – менее 1 секунды;
- количество циклов – 100.

Результаты испытания

Было обнаружено, что испытание проведено неправильно. Вместо того, чтобы изменить конфигурацию привода с модификации «пружина закрывает» на «пружина открывает» (это необходимо для преодоления сопротивления от перепада давления на седле в начале хода пружины), привод (а не внутренние детали) был просто повернут на 90° и остался в состоянии «пружина закрывает». Это означает, что при воздействии на седло перепада давления ход возможен только при помощи гидравлики (время открытия равно 40 секундам), а ход пружины является закрывающим. Все записанные параметры испытаний соответствовали наблюдаемым и повторялись.

Когда обнаружилась ошибка, то конфигурация привода была изменена на «пружина открывает». Испытания начались снова, но отказ появился уже во время второго цикла (уплотнительная поверхность седла была разрушена). При разборке арматуры обнаружили частичные повреждения шара и седла, которые выглядели как задиры.

Возможные причины повреждений

Периодические повторения нагрузок, которые произошли при неправильном циклическом испытании (гидравлика работала против часовой стрелки, то есть на от-

крытие) означают, что при этом имела место некоторая приработка шара и уплотнения седла. При изменении конфигурации привода на «пружина открывает», направление вращения при испытании было изменено и стало осуществляться гидравликой по часовой стрелке. Такой вариант направления вращения никогда ранее не был проверен. У изготовителя были некоторые сомнения в поведении уплотнительных поверхностей, притертых в одном направлении, а потом нагруженных в противоположном. Можно предположить, что шероховатость поверхности и форма микронеровностей при приработке в одном направлении, в основном, была ориентирована в этом направлении.

Проведение движения в противоположном направлении может означать, что происходит деформация микронеровностей шара и седла, создавая при этом местное существенное превышение допустимых значений контактных давлений, которое служит источником задиров. Этого обстоятельства определенно следует избегать при следующих циклических испытаниях посредством вращения шара в одном направлении.

Задирание зависит от контактного давления и скорости подвижных частей. Для покрытия из карбида вольфрама обычно ограничивают контактное напряжение до 207 МПа (30,000 фунтов на кв. дюйм). Для данного применения из-за короткого времени закрытия изготовитель использовал контактное напряжение 112 МПа при перепаде давления 690 бар. Проблема в том, что мы не очень хорошо понимаем влияние на процессы скорости.

Решение

Согласно условиям предварительных испытаний, скорость в начале хода пружины и в шаре, не прижатом к седлу полным перепадом давления, отличается от условий при окончании выпрямления пружины (окончании закрытия). Следует принять во внимание эффект пружины, хорошо отраженный во всех записях благодаря датчику положения, который указал, что скорость в начале выпрямления пружины была в 2-3 раза больше, чем скорость в конце хода.

Заключение. При предварительных испытаниях использовались скорости в 2-3 раза большие, чем в наихудшем из возможных случаев (которые были включены в условия испытаний). Вдобавок время хода пружины привода составляло приблизительно 0,6-0,7 секунды (по ТУ – 1 секунда). Таким образом, условия испытаний, касающиеся скорости, можно рассматривать как в 3-5 раз худшие, чем требуемые.

Фирмы Technip и ВР решили произвести пересмотр параметров испытаний для создания более реальных условий:

- Принять во внимание эффект пружины;
- Проверить реальное давление, которое возникает при закрытии арматуры.

Рассматривая расход (скорость) потока среды из скважины и объем между скважиной и арматурой системы HIPPS, можно рассчитать повышение давления при закрытии арматуры в течение 1 секунды. Полученный ре-

зультат составил 214 бар. Это значение максимально из-за того, что при закрытии арматуры часть потока среды пройдет через арматуру, так что реальное повышение давления может быть меньше.

Мы решили использовать следующие параметры:

- Перепад давления 214 бар;
- Время хода, чтобы учесть эффект от действия пружины, установить 2,8 секунды.
- Среда – водород (который ближе к рабочей среде, преимущественно состоящей из газа).

Новое испытание было проведено успешно. Задиры не обнаружены.

◆ Задвижки для системы HIPPS

Это 12-дюймовые проходные шиберные задвижки с массивным шибером. Корпусные детали изготовлены из супердуплексной стали ASTM F590 сорта 5A. Внутренние детали – из супердуплексной стали с покрытием карбидом вольфрама толщиной 200 микрон.

Проблема

При гидростатическом испытании обнаружена существенная протечка в седле. Задвижка была разобрана и исследована. Полость седла оказалась пластически деформированной, о чем можно было судить как по размерам, так и по зазорам. Был сделан вывод, что пластическая, наряду с упругой, деформация, которая может возникнуть при гидростатических испытаниях, станет причиной протечек в уплотнении седла и корпуса.

Решение, предложенное производителем

Основываясь на предыдущем опыте, производитель предложил изучить изменение давления на корпус арматуры при циклических испытаниях. Он ссылаясь на феномен приработки. При увеличении давления изнутри на корпус арматуры вплоть до давления гидростатических испытаний некоторые зоны материала корпуса будут подвержены пластической деформации. Когда давление для испытаний прекратится, в материале останется остаточное сжимающее напряжение. Последующее повышение давления на корпус арматуры приведет к снижению растягивающего напряжения и, таким образом, меньшей пластической деформации. После нескольких циклов возможно совсем устранить пластическую деформацию.

Были проверены три процедуры упрочнения:

- I Два цикла испытаний давлением при 15 К фунтов на кв.дюйм в течение 60 минут (общая продолжительность 2 часа).
- II 25 циклов испытаний давлением при 15 К фунтов на кв.дюйм в течение 15 минут (общая продолжительность 6,25 часа).
- III 7 циклов испытания давлением при 15 К фунтов на кв.дюйм (общая продолжительность 11 часов):
 - 4 цикла по 15 минут – проведение измерений после циклов;

- 1 цикл продолжительностью 3 часа – проведение измерений после циклов;
- 1 цикл продолжительностью 2 часа – проведение измерений после циклов;
- 1 цикл продолжительностью 5 часа – проведение измерений после циклов.

Только вторая процедура стабилизировала корпус. Вероятно, количество циклов predetermined продолжительностью каждого из них, но не были проведены сравнительные испытания только одного цикла упрочнения такой же продолжительности. Было решено применять вторую процедуру для всех корпусов арматуры.

Дополнительные испытания и исследования для оценки арматуры

Мы согласны представить протокол проведения упрочнения, но в тоже время для лучшего понимания проблемы мы решили провести следующие исследования:

- I. Исследование прочности арматуры методом конечных элементов.
- II. Дополнительное механическое испытание образца, взятого из корпуса арматуры
- III. Криогенное испытание ползучести материала для оценки долгосрочного поведения супердуплексной стали при рабочих температуре и давлении.

I. Исследование конструкции арматуры методом конечных элементов

Корпус арматуры спроектирован согласно API 6A, что означает:

- Принята методика, описанная в коде ASME BPV, секция VIII, раздел 2, с учетом нагрузок, ограниченных следующими критериями:
 - $S_t = 0,83S_y$ и $S_m = 2S_y/3$,
 - где S_t – допустимое напряжение при пробном давлении гидростатических испытаний, S_m – допустимое расчетное мембранное напряжение при определенном рабочем давлении, а S_y – предел текучести.
 - В данном случае материал не имеет определенной точки начала текучести, поэтому принимается, что условный предел текучести соответствует 0,2% относительного удлинения.
 - Материал – супердуплексная сталь по ASTM F590 сорт 5A.
 - Предел текучести $S_y = 75$ ksi.
 - Предел прочности при растяжении $S_u = 100$ ksi.
- Критерии, которые использовал изготовитель:
- При нормальной температуре $S_y = 75$ ksi.
 - При 100 °C $S_y = 55$ ksi.
 - Допустимое рабочее напряжение 33 ksi.

- Допустимое напряжение при гидростатических испытаниях 48,5 ksi.
- Допуск на качество литья – 0,9.
- Производственный допуск – 1,15.
- Путем вычислений толщина стенки принята 3,125 дюйма.

Согласно коду ASME вычисления основаны на простых формах, поэтому использованные критерии дают удовлетворительные результаты.

II. Механическое испытание образца материала, взятого из корпуса арматуры

Чтобы лучше определить механические характеристики материала, мы решили провести дополнительные механические испытания образца, взятого из корпуса, и проверить нет ли существенного расхождения по сравнению с сертификатом на материал. Образцы для испытаний были взяты из днища арматуры, самой тяжелой ее части.

В результате при комнатной температуре получили S_y (предел текучести) 443 – 465 МПа. Обнаружилось, что это значение ниже требуемого по ASTM (должно быть 515 МПа). При испытаниях при температуре 85 °C $S_y = 424 – 452$ МПа. Другие показатели соответствовали требованиям стандарта.

III. Исследование конструкции корпуса арматуры на предмет упругой/пластической деформации при помощи расчета методом конечных элементов

Используя кривую напряжение-деформация, полученную при испытаниях материала, был проведен анализ с применением метода конечных элементов для оценки напряжений при учете пластической деформации. Результаты приведены в *табл. 1* (для пиковых напряжений).

Таблица 1

Давление, (фунты на кв. дюйм)	Пиковое напряжение, (МПа)
10,000	467
11,000	494
15,000	535

Распределение напряжений показано на *рис 1 и 2*.

Пиковое напряжение приходится на область седла. При 10,000 фунтов на кв.дюйм пиковое напряжение равно измененному пределу текучести (S_y), а при 15,000 (давление испытаний) пик превышает измеренный S_y . Таким образом, может произойти пластическая деформация, (*см. табл. 2*).

Ожидаемые результаты значительно ниже, чем измеренные значения, хотя тенденция результатов такая же.

Таблица 2

	Ожидаемый (дюймы)	Измеренный (дюймы)	Соотношение
Зазор в затворе (по оси)	0.122	0.305	1/ 2.5
Горизонтальный диаметр седла	0.072	0.330	1/ 4.6
Вертикальный диаметр седла	0.005	0.051	1/ 10

Рис. 1. Распределение напряжений при давлении 15,000 psi и нормальной температуре по результатам линейного анализа

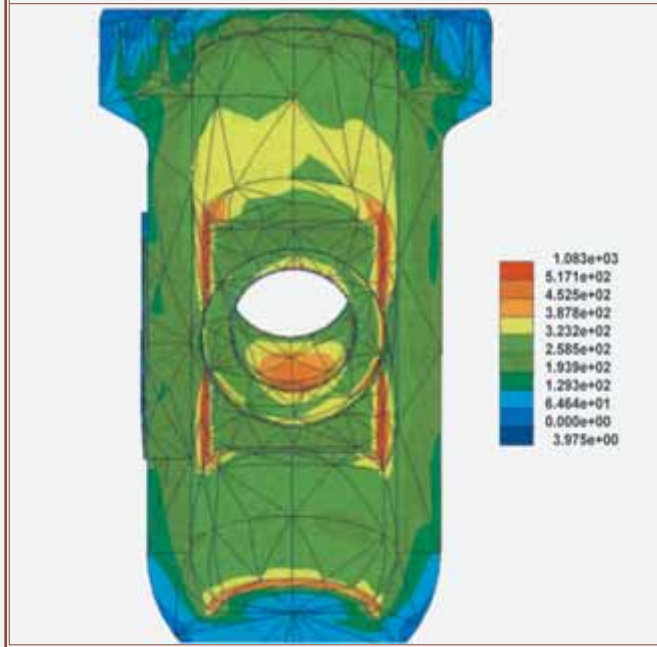
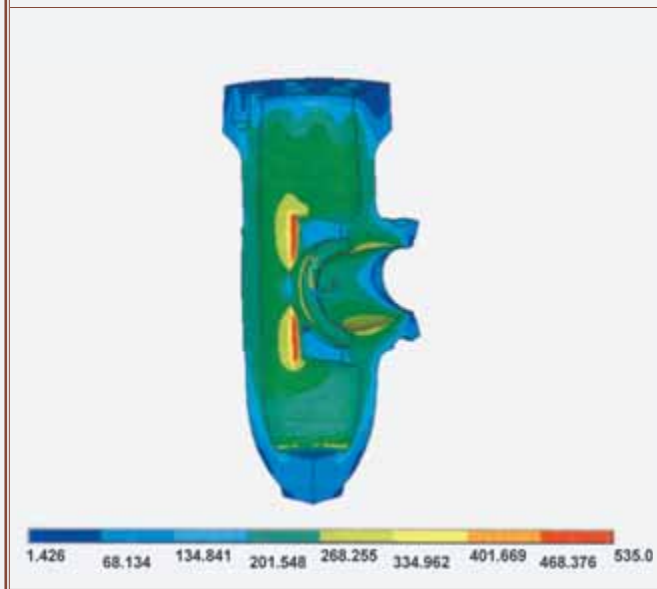
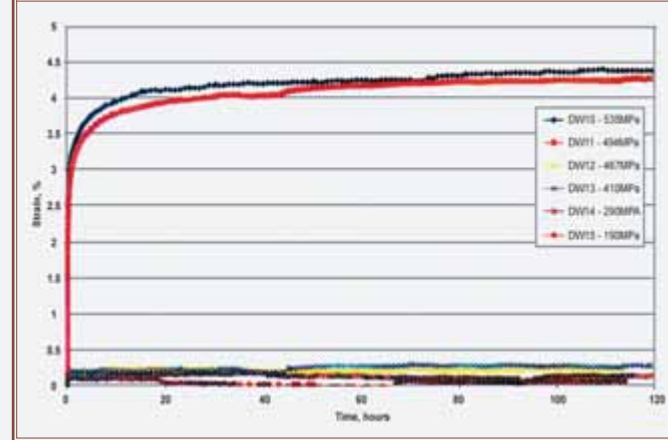


Рис. 2. Распределение напряжений при давлении 15,000 psi и нормальной температуре по результатам нелинейного анализа



Из проведенного нелинейного анализа видно, что возможна пластическая и остаточная деформация. Однако

Рис. 3. Кривые ползучести образцов, подвергнутых испытаниям после упрочнения давлением 535 МПа (25 циклов по 15 минут)



анализ предполагает, что на практике остаточная деформация будет меньше, чем измеренная. Это возможно из-за неоднородности свойств материала отливки и за счет того факта, что расчет не принимает во внимание длительную ползучесть материала при нагрузке.

Криогенное испытание ползучести супердуплексной стали

Из-за высокой нагрузки на образец и различия между ожидаемой и измеренной деформацией, мы решили исследовать поведение супердуплексной стали при воздействии низких температур. Были проведены 6 криогенных испытаний на образцах, взятых из днища корпуса арматуры. Они стали предметом «стабилизации» после процедуры предварительной деформации, когда в течение 25 циклов материал подвергался нагрузке на растяжение при 535 МПа и выдерживался каждый раз в течение 15 минут для моделирования процедуры стабилизации арматуры, которую рекомендовал изготовитель.

Следуя смоделированной процедуре упрочнения, образцы после криогенной текучести были нагреты до 85 °С (рабочая температура арматуры). Образцы подвергались специфической нагрузке на стендах в течение 5 дней. Диапазон нагрузок был от максимальной 535 МПа до минимальной 190 МПа. Результаты приведены в табл. 3 и на рис. 3.

Можно сделать заключение, что супердуплексный материал арматуры после смоделированной процедуры упрочнения невосприимчив к низкотемпературной ползучести при 85 °С, при ограниченных нагрузках до 467 МПа

Таблица 3

Прилагаемая нагрузка, МПа	Начальная деформация, %	Конечная деформация, %	Деформация ползучести 5 дней*, %
535	2.10	4.38	2.30
494	2.00	4.26	2.25
467	0.236	0.250	< 0.05
410	0.210	0.278	< 0.05
290	0.148	0.134	< 0.05
190	0.086	0.051	< 0.05

* Абсолютная точность измерения деформации ползучести около ± 0,05%

(эквивалентной давлению 10,000 фунтов на кв. дюйм в самой арматуре и ниже). Супердуплексный материал арматуры после процедуры стабилизации может подвергнуться низкотемпературной ползучести при 85 °С при нагрузке 494 МПа и выше, если нагрузка будет постоянной.

Неразрушающий контроль после циклической нагрузки давлением

Мы решили провести неразрушающий контроль корпусов арматуры после упрочнения давлением. Контроль состоял из 100% рентгенографического обследования корпусов и 100% исследования проникающей жидкостью области, подвергающейся высокой нагрузке. Его целью было проверить, появились ли или не увеличились ли любые трещины после процедуры упрочнения.

Один корпус был отбракован вследствие наличия трещин, количество которых превышает допустимые критерии. Однако было трудно определить, появились ли эти трещины во время упрочнения давлением, или они уже существовали, но не были обнаружены из-за низкого качества начального рентгеновского контроля.

◆ Заключение

Шаровой кран для систем HIPPS. Очень важно полностью определить и контролировать соотношение между контактным напряжением и скоростью перемещения упрочненных поверхностей скольжения при высоких скоростях хода под воздействием высокого давления.

В будущем для таких областей применения будет полезно проводить испытания образцов, которые имеют те же покрытия, что и у поставляемой арматуры.

Задвижки для системы HIPPS:

необходимость в ограничении толщины стенок литой супердуплексной стали из-за критического состояния после термообработки.

После обсуждения данной проблемы со специалистами французского института SETIM, мы пришли к выводу, что свойства дуплексных материалов существенно зависят от термической обработки. Критическим фактором является закалка. Для больших корпусов с толстыми стенками очень трудно создать однородную скорость остывания. Невозможно остужать среднюю внутреннюю часть также быстро, как и крайнюю. Даже если образцы для испытаний, соответствующие сертификату на материалы, взяты из соответствующей части корпуса как определено нормативами, мы можем получить некоторые неожиданные результаты. В нашем случае в сертификатах на материалы указаны значения предела текучести при нормальной температуре 517 – 630 МПа, тогда как из других частей корпуса эти значения будут 443 – 465 МПа.

По мнению авторов, использование супердуплексных литых материалов должно быть ограничено максимальной толщиной стенки корпуса арматуры 80 – 100 мм.

Задвижки для системы HIPPS:

необходимость ограничения расчетных напряжений при проектировании изделий из дуплексных сталей.

При проектировании изделий в соответствии с API 6A особенно важно обеспечить значительный гарантийный резерв безопасности между допустимым напряжением и механическими свойствами, соответствующими нормам. Это – экономичный подход, при котором используются высокопрочные материалы. Если проектирование выполнено в соответствии с ASME B16.34 по классу 4500, толщина стенок может быть значительно больше. Однако представляется очевидным, что существующие критерии API 6A не могут быть слишком консервативными для некоторых материалов.

Допускаемые приведенные мембранные напряжения S_m в соответствии с API 6A равны $2S_y/3$ (S_y – предел текучести). Минимальные S_m в соответствии с ASME B31.3 (расчетный код для трубопроводов) принимаются $2S_y/3$ и $S_u/3$.

В соответствии с результатами испытаний одной из частей корпуса, проведенных при температуре 100 °С (424 МПа – текучесть, 648 МПа – предельное напряжение), мы получили: $S_m = 283$ МПа, в соответствии с API 6A, и 216 МПа, в соответствии с ASME B31.3. Изготовитель использовал значение 253 МПа, которое является консервативным по сравнению с API 6A, но которое выше критерия по B31.3.

Мы также знаем, что в варианте расчетов, выполняемом изготовителем, не описывается вся сложность формы арматуры. В расчетах с применением метода конечных элементов приведены несколько точек высоких местных напряжений. При давлении испытаний в 15,000 фунтов на кв.дюйм напряжения в зоне концентрации составляют 535 МПа и превышают предел текучести S_y , принятый по стандарту ASTM (515 МПа).

◆ Извлеченные уроки

Необходимо рассчитывать допустимые напряжения в соответствии с B31.3 для литья из супердуплексных материалов.

Ограничить выбор литой супердуплексной нержавеющей стали для деталей с толщиной стенок не более 100 мм.

Для новых конструкций из этих материалов, необходимо провести расчет напряженно-деформированного состояния с учетом сложной геометрической формы.

*Сокращенный перевод с английского – Е.П. Михайлова
Научная редакция – О.Н. Шпаков при участии Р.А. Азарашвили*