

Работа P0607 представлена на конференции Valve World 2006 7-9 ноября 2006г в МЕСС Maastricht, Netherlands. Подробности на сайте www.valve-world.net.

Литейные материалы для вентилях, предназначенных для эксплуатации в морской воде. Алюмоникелиевая бронза и альтернативные материалы.

J.R.C. Strang, Shipham Valves

Ключевые слова: Seawater, corrosion, nickel-aluminium bronze, pressure-temperature ratings, stainless, steel, 6Mo, duplex, super duplex, nickel alloys, titanium.

Аннотация

Алюмоникелиевая бронза (NAB) используется как материал для эксплуатации в морской воде уже много лет, отличное себя зарекомендовавший в этом качестве. Однако в случаях, где основное внимание уделяется снижению затрат на приобретение или уменьшению издержек за весь срок службы (включая разработку, изготовление и эксплуатацию) этот материал занимает не совсем привлекательное место в одном ряду с альтернативными материалами между самым дешевым вариантом представленным чугунами и более дорогими первоклассными материалами, такими как титан или супердуплексные сплавы на основе никеля. Настоящая работа ставит своей целью показать, что применение материала NAB является экономически выгодным решением, позволяющим обойтись как без низкокачественных дешевых материалов, так и крайне дорогих первоклассных замен. Существует очень немного аналогов материалов обладающих полным набором требуемых характеристик в диапазоне от стандартных обычно применяемых материалов до титана, среди них имеются медные сплавы и двухфазные сплавы из нержавеющей стали. В настоящей работе сравниваются механические свойства и функциональные характеристики материалов в средах с различными коррозионными свойствами, а также данные по затратам связанным с производством вентилях. Обзорные данные основаны на обширном опыте Shipham в области производства вентилях из почти всех рассматриваемых здесь материалов; использованы также ссылки на публикации из различных источников.

В список рассматриваемых материалов входят чугун, углеродистая сталь, нержавеющая сталь 316 и 6Mo, дуплексные и супердуплексные нержавеющие стали, никелевые сплавы и титан, а также отобранные высококачественные алюмоникелевые бронзы. Сюда же входят материалы с обычными антикоррозионными свойствами.

Дополнительно обсуждаются характеристики поведения алюмоникелевых бронз при различных температурах и давлениях. С одной стороны широко известно, что материалы класса 150 выдерживают рабочее давление максимум «около 20 бар», но также известно, что предел рабочего давления для бронзовых сплавов не превышает 15,5 бар. Истина лежит где-то между этими предельными значениями. НЕ существует стандарта, который одновременно бы указывал максимально возможные параметры для алюмоникелиевых бронз и устанавливал предельные значения для экономичного и безопасного применения изделий из этого материала.

В заключение показано, что материал NAB особенно выгоден для эксплуатации в морской воде, несмотря на повышенную температуру среды и ограничения связанные с наличием в ней сернистых соединений. Основные преимущества материала сводятся к следующим:

- он более дешевый, чем экзотические нержавеющие стали и экономически эффективен;
- его общие антикоррозионные свойства, подверженность точечной коррозии и образованию раковин, устойчивость к кавитации сравнимы с параметрами

супердуплексных сплавов и значительно превышают характеристики стандартных сплавов;

- он выгодно отличается хорошей теплопроводностью, не подвержен истиранию и биологическому обрастанию, а также
- имеет номинальные характеристики «давление-температура» значительно превышающие параметры установленные стандартами для бронзы.

Прилагается обширный список литературы, полезный для проведения дальнейших исследований по этому вопросу.

1. Вступление

Бронза, как сплав меди и олова, представляет собой древний материал давший название «бронзовому веку», занимающему место где-то между «каменным веком» и «железным веком», вероятно на рубеже 4-го тысячелетия до новой эры. Сам термин «бронза» ставит в невыгодное положение алюминиевые бронзы, поскольку вероятно вызывает ассоциации с древним материалом немедленно ведущие к сравнению алюминиевых бронз с примитивными медно-оловянными сплавами.

В контексте вышесказанного следует упомянуть, что алюминиевая бронза является современным материалом. Сочетание меди и алюминия впервые появилось 1800-е годы. Сплав был очень дорогим в производстве и, следовательно, мог быть только объектом исследования для металлургов, не получив широкого применения. На рубеже следующего столетия были исследованы дополнительные легирующие добавки к сплаву, а в 1913г Дюрвиль усовершенствовал метод опрокидывающегося ковша и получил слитки алюминиевой бронзы. Метод Дюрвиля был необходим для удаления дефектов усадки и последствий оксидных включений, возникающих частично благодаря суженному интервалу температур кристаллизации сплава. Метод оказался настолько успешным, что правительство Франции использовало сплав Cu9Al для выпуска монет по 50 сантимов, 1 и 2 франка.

Чарльз Х. Мей (Meigh) в дальнейшем еще более усовершенствовал указанный метод и сотрудничал с французским Адмиралтейством по производству алюмоникелиевой бронзы (Cu₁₀Al₃Ni₃Fe₃Mn). Дальнейшие работы металлургов привели к разработке сплавов и повседневное коммерческое использование этих сплавов получило развитие с ростом потребности в винтах для морских судов, пригодных для повышенных скоростей плавания. По утверждению Мей (2000, ххix) «... алюмоникелевая бронза NAB в два раза более устойчива к воздействию коррозии, чем марганцевая бронза или нержавеющая сталь...», поэтому материал NAB стал наиболее широко используемым материалом для указанного применения. Применение бронзы NAB еще более расширилось с ростом нефтяной промышленности, где NAB использовалась для изготовления пожарных насосов работающих на морской воде. Военно-морской флот разных стран также крайне широко использует этот материал, заменивший ранее применявшийся оружейный сплав CuSnPbZn благодаря своей прочности и пригодности к сварке. Полагают, что потеря атомной подводной лодки США «Трешер» в 1963г из-за дефекта в литье ускорила переход к использованию NAB в применениях для подводного флота (Meigh, 2000).

Позже с появлением супераустентичных и дуплексных нержавеющих сталей начала развиваться тенденция к применению более современных материалов, включая в некоторых случаях даже такие экзотические и дорогие материалы как титан. К 1986 г окончательно утвердилось использование труб из медно-никелевых сплавов с вентилями из бронзы NAB. По причинам неудовлетворительных весовых, прочностных характеристик и ограничений по скорости потока (при скоростях протекания свыше 3,5м/с в медно-никелевых трубах начиналась эрозия) началось изучение возможности применения более новых материалов. Например, оказалось, что трубу из медно-

никелевого сплава диаметром 20 дюймов можно заменить трубой диаметром 14 дюймов из материала 254 SMO (Gallager, Mallpass & Shone, 1986). Последующий опыт применения таких новых материалов показал наличие ограничений по температуре применения и стоимости контроля качества литья. Настоящая статья служит напоминанием о достоинствах NAB и о том, что этот материал всегда может занять свое место в ряду аналогичных материалов между самыми дешевыми и самыми экзотическими альтернативами.

2. Что такое алюмоникелевая бронза?

Наряду с используемым сплавом бронзы и алюминия (без никеля) для изготовления вентиляей наиболее широко применяется дуплексный сплав содержащий 8-10% алюминия с добавками железа и никеля для увеличения прочности; такой сплав известен как алюмоникелевая бронза. К сожалению, его часто неправильно называют «алюминиевая бронза» для упрощения. В настоящей работе рассматривается только алюмоникелевая бронза NAB. Выпускаются как отливки, так и поковки из сплава NAB. Основные типы литейных сплавов сводятся к следующим: сплавы по американскому стандарту ASTM B148 UNS C95800 Nominal Cu bal 9Al 4,5Ni4Fe 1,2Mn, UNS C95800 Nominal Cu bal 11Al 4Ni4Fe ; сплав по европейскому стандарту EN1982 CC333G Nominal Cu bal 11Al 5Ni5Fe.

Следует также упомянуть все еще применяемые (несмотря на устарелый стандарт) сплав AB2 по британскому стандарту BS1400 и аналогичный кованный сплав по техническим условиям британского ВМФ DEF STAN02-833. Указанные сплавы идентичны и различаются только в некоторых деталях касающихся содержания марганца и сбалансированности добавок железа и никеля.

Механические свойства сплавов рассмотрены ниже, но все рассматриваемые сплавы NAB относятся к материалам высокой прочности. Впрочем, инженерам хорошо известно, что прочность не является единственным основным качеством металла, существенную роль играет, например, вязкость. В этом случае компромиссный выбор следует делать между сплавом C95500 имеющего удлинение 6% при минимальной прочности на разрыв 620 МПа и сплавом C95800 имеющего удлинение 15% при минимальной прочности на разрыв 585 МПа.

Если коротко, то основные качества рассматриваемого материала сводятся к следующему: он пригоден для сварки, литья и имеет выдающуюся стойкость к воздействию коррозии благодаря образующейся на поверхности оксидной пленке. Показатели по ударопрочности и стойкости к истиранию также отличные (модификации этого материала могут применяться для изготовления подшипников), он не дает искрения и обладает относительно низкой магнитной проницаемостью, алюмосиликоновые бронзы можно использовать там, где требуется почти нулевая магнитная проницаемость при высокой коррозионной устойчивости. Электропроводность и теплопроводности также очень хорошие. Кроме того, бронза NAB сохраняет свою прочность и вязкость при низких температурах и пригодна для криогенных применений.

При рассмотрении изоляционных свойств материала выводы также весьма положительны, но при условии, что сравнение с альтернативными материалами проводится при правильной оценке эффективности их применения. Сравнительное рассмотрение механических и антикоррозионных свойств приведено в следующих разделах.

3. Механические свойства

На рис.1 показаны определяемые стандартом показатели по прочности на разрыв и пределу текучести для представительных сплавов выбранных из сравниваемых групп материалов.

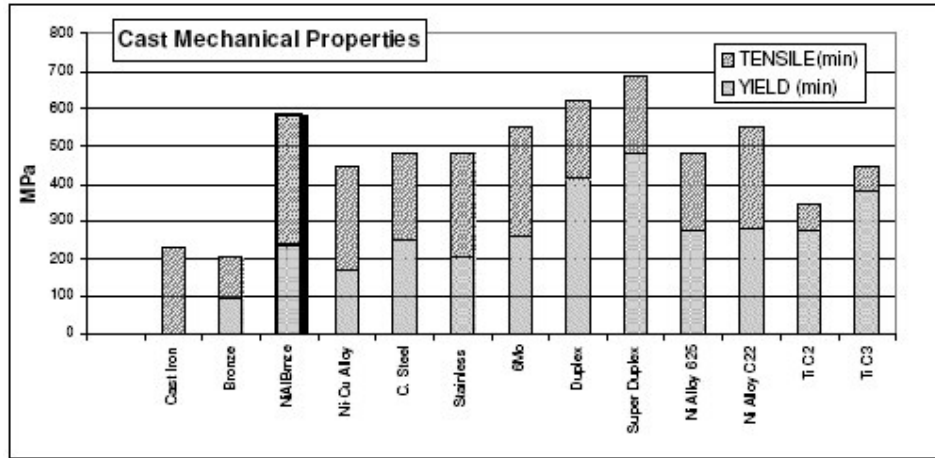


Рисунок 1. Механические свойства выбранных литевых сплавов

Cast mechanical properties- механические свойства для литейных материалов ;

tensile (min)- предел прочности минимальный ;

yield (min)- предел текучести минимальный ;

MPa-МПа ;

cast iron- чугун;

bronze- бронза;

alloy-сплав ;

stainless- «нержавеяка»;

duplex-дуплексный ;

super duplex-супердуплексный

Рис.1 дает ясное представление по нескольким аспектам. Во-первых, имеется разительная разница в свойствах между чистой «бронзой» и сплавом NAB, что свидетельствует об ущербе для репутации NAB, наносимом причастностью его к медным сплавам под общим названием «бронза». Предел текучести для NAB более чем в два раза превышает аналогичный показатель для бронзы, известной также как «пушечная бронза» или бронза для вентиляей.

Во-вторых, возможно ещё удивительней то, что механические свойства NAB превышают аналогичные свойства медно-никелевого сплава известного как «монель». При наличии особо прочных ковких медно-никелевых сплавов, например K-500, обычные литейные сплавы имеют не столь высокие эксплуатационные характеристики, как показано на рисунке.

В третьих, обычные углеродистые и нержавеющие стали не слишком выделяются по базовым механическим свойствам. Фактически значительное преимущество перед NAB по механическим свойствам имеют только дуплексные и супердуплексные материалы.

Для применений в вентилях механические свойства конструкционного материала не имеют решающего значения. В целях стандартизации размеров стандарты на вентиля и фланцы обычно указывают стандартный набор размеров привязанный к значениям класса давления, и тут же приводят номинальные значения параметров давления-температуры соответствующие набору размеров по конкретным группам материалов. В этом случае на первый план по важности выходят параметры давления-температуры. Номинальные значения таких параметров зависят от механических свойств материала

и от поведения материала при различных температурах. Таким образом сравнение фактически выполняется между номинальными значениями параметров для различных материалов.

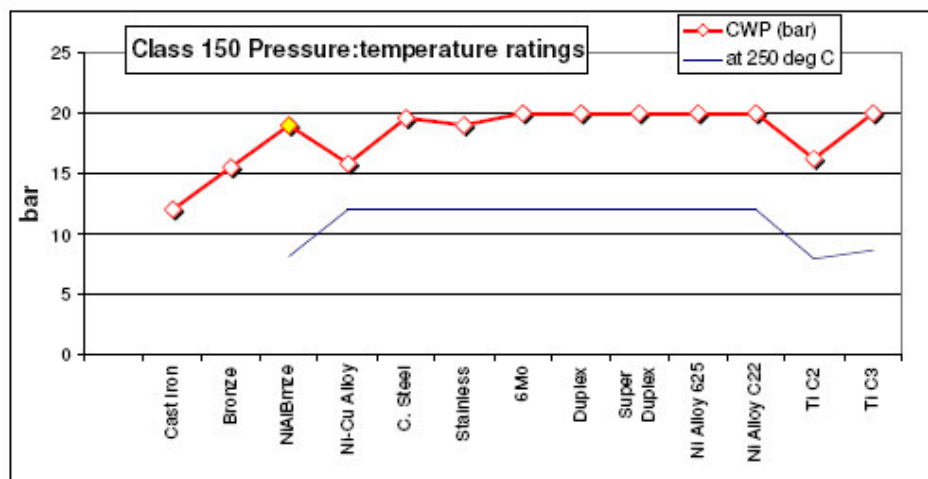


Рисунок 2. Сравнительные данные по номинальным значениям параметров давления-температуры

Class 150. Pressure: temperature ratings- Класс 150. Номинальные значения параметров давления-температуры- ;
CWP(bar)-давление деформации в холодном состоянии;
at 250 deg C- при 250°C

На рисунке 2 показано давление деформации в холодном состоянии для различных материалов. Сравнение не является прямым и исчерпывающим, поскольку приведенные цифры по чугуно и бронзе относятся к фланцам с гладкой уплотнительной поверхностью, остальные размеры приведены для фланцев с выступом и соответствуют требованиям ANSI B16.5. Подробные пояснения будут даны в тексте ниже, так же как и пояснения почему по титану и NAB приведены расчетные данные.

Сравнение между значениями параметров давление-температура и механическими свойствами показывает, что разница между свойствами различных материалов сглажена. Сам способ определения номинальных значений параметров предполагает наличие верхнего предела (потолка) давления налагаемого для ограничения деформаций. Потолок давления относится к таким материалам как 6Mo, дуплексные сплавы и никелевые сплавы.

Для сравнения приводится кривая значений параметра для температуры 250C, что делает заметным недостатки сплавов на основе меди при повышенных температурах. Значения давления для бронзы отсутствуют, для NAB и для титана эти значения меньше, чем для большинства остальных материалов. Максимальные значения температуры и давления по каждому материалу приведены в Приложении II. Благодаря наличию потолка давления разница в свойствах материалов еще более сглаживается.

По механическим свойствам NAB, как видно, вполне конкурентоспособен с альтернативными материалами. Есть правда ограничения по высоким температурам, но это не относится к условиям эксплуатации в морской воде.

3. Сравнение по антикоррозионным свойствам

Коррозия относится к сложным явлениям имеющим много переменных величин, в том числе допуски по химическому составу и режимам термической обработки. Сложность

явления еще более увеличивается неопределенностью условий среды при эксплуатации в морской воде. Сама перекачиваемая среда является здесь только одним из компонентов и значительное влияние приобретают состав окружающей среды, давление, температура и скорость потока.

Неопределенность условий морской среды увеличивается еще и вариациями географических условий, а также биологической активностью среды. Крупные нефтяные компании вкладывают много средств в металлургические аспекты и контроль коррозии. Интересно наблюдать за подходом конкретной компании в решении металлургических вопросов; например, в Северном море существует граница, по одну сторону которой бронза считается подходящим материалом для гидрантов, а по другую сторону для этого применяется только титан. Все это доказывает, что несколько аналогичных проблем можно решать различными способами.

Отсюда следует вывод о пользе обобщенного подхода при поиске решений. На это же указывают и множество источников из списка литературы (Приложение IV). Разочаровывает здесь то обстоятельство, что несмотря на обилие исследований и работ по сравнительной коррозионной устойчивости как правило нельзя отыскать точный аналог для сравнения, и приходится пользоваться методом экстраполяции. Неизбежно приходится сталкиваться с тем, что сравниваемые условия нестабильны и варьируются, часто даже нельзя выделить из них главное и существенное. Последующее краткое изложение имеет целью помочь в предоставлении общей картины, в каждом же частном случае необходим учет особенностей конкретной ситуации.

3.1 Сплошная коррозия

Для большинства из рассматриваемых материалов сплошная коррозия не является проблемой, кроме углеродистой стали и чугуна, которые требуют нанесения защитного покрытия.

3.2 Точечная коррозия и щелевая коррозия

Точечная коррозия образуется в спокойной воде и является результатом воздействию неоднородностей в составе морской воды. Это один из важных дифференцирующих факторов при рассмотрении анализируемых материалов. Здесь можно использовать тесты для определения критической температуры возникновения точечной коррозии (СРТ) или применить расчетные методы определения устойчивости нержавеющей стали к точечной и щелевой коррозии в хлористой среде, для характеристики такой устойчивости используется число эквивалента устойчивости к точечной коррозии ($PREN = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + \{16 \text{ or } 30\} \times \%N$). Такой эквивалент определяет скорее момент возникновения точечных раковин, но не глубину раковины. Наиболее подвержены такой коррозии различные стали, с повышением легирования стали проблема исчезает. Следует заметить, что глубина раковин на дуплексных сталях более выражена, чем на аустенитных материалах и что сплав 22Cr duplex в воде с высоким содержанием хлора имеет низкую устойчивость к точечной и щелевой коррозии. В случае контакта с необработанной морской водой рекомендуется принимать меры предосторожности (Smith, Celant & Pourbaix, 2000; HSE Safety Notice 3/2003, Norsok M-001).

Материал NAB не замечен в подверженности воздействию точечной коррозии и минимально подвержен воздействию щелевой, но имеет тенденцию к коррозионному растрескиванию вызванному химическим стрессом в хлористом растворе (Oldfield and Masters, 1996).

3.3 Кинематический эффект

Здесь рассматриваются следующие типы коррозии: эрозия, кавитация и ударная коррозия при больших скоростях потока, а также обрастание морскими микроорганизмами в малоподвижной воде.

Обрастание возникает вследствие прикрепления микроорганизмов к поверхности материала. При наличии аэрации возникает коррозионная раковина. Считается, что медные сплавы хорошо зарекомендовали себя в этой ситуации, поскольку медь неблагоприятна для многих типов микроорганизмов. Сплав Ni-Cu имеет некоторую устойчивость к обрастанию, устойчивость остальных сплавов крайне низкая. (Tuthill & Shillmoller, 1965).

С увеличением скорости потока растет приток кислорода к поверхности металла и это может значительно увеличить скорость образования коррозии.

Оцинкование продлевает срок службы изделий из углеродистой стали примерно на 6 месяцев (Todd). Повышенная скорость потока, особенно при содержании в потоке абразивных частиц, может способствовать сдиранию защитной оксидной пленки. Это в частности относится к медным сплавам, применение которых имеет ограничения по скорости потока среды. Разные источники по разному определяют величину этого ограничения, но наиболее часто для материала NAB упоминается скорость 4,3 м/с, при периодической эксплуатации рекомендуется максимум 10 м/с (Norsok M-001); при этом скорость 23 м/с установлена как рекомендуемая максимальная окружная скорость для насосов и крыльчаток (Tuthill, 1987).

3.4 Температура

В общем случае повышение температуры ускоряет протекание химических реакций и процессов коррозии. Однако, при повышенных температурах уменьшается содержание кислорода, что приводит к противоположному эффекту. Эффективная скорость коррозии определяется в этом случае соотношением указанных двух факторов. Указанное обстоятельство имеет значение для щелевой коррозии на нержавеющей стали и дуплексных нержавеющей сталях, поэтому рекомендован предел температуры среды 20°C для материалов с содержанием 6Mo, 22Cr, 25Cr, эксплуатируемых в морской воде с образованием щелевой коррозии (Norsok M-001, при максимальном содержании свободного хлора 1,5 ppm). Другие рекомендованные значения температур: -46°C для 22Cr и -30°C для 25Cr при температуре морской воды максимум 15°C с образованием щелевой коррозии и 30°C без щелевой коррозии (Tystad, 1997). Можно предположить, что процесс коррозии ускоряется и на материале NAB, однако никаких вредных последствий этого замечено не было.

3.5 По поводу электрохимической коррозии

Электрохимическая коррозия возникает при протекании тока между металлами погруженными в электролит, которым служит морская вода. Степень коррозии зависит от расстояния между металлами-электродами в гальванической цепи и разности потенциалов, возникающей между металлами-электродами. Влияние электрохимической коррозии значительно и часто служит причиной подбора материала вентиля в зависимости от материала самого трубопровода. Большое значение имеет и величина незащищенной поверхности металла.

В общем случае NAB является более анодным материалом, чем другие рассматриваемые материалы, кроме углеродистой стали, чугуна и бронзы и поэтому вероятность его корроирования при контакте с другими металлами выше. Это качество подчеркивается в рекомендациях не позволяющих применять NAB в паре со сплавами 25Cr в природной морской воде (Francis, 1999) (1).

Для получения максимальной защиты применяется в том числе и подбор разнородных материалов. В частности, используется отделка корпусов из NAB сплавом NiCu,

который включается в схему защиты и способствует тому, что коррозия на больших участках поверхности материала NAB проходит незаметно.

3.6 Прочие условия вызывающие коррозию

Материал NAB не следует применять в морской воде зараженной сероводородом. Для дуплексных материалов также предусматриваются меры предосторожности (Smith et al, 2000; Norsok M-001).

В общем случае NAB хорошо себя зарекомендовал в кислотной среде, в среде с повышенным содержанием щелочи растворяется защитная пленка и ускоряется образование коррозии.

(1) Однако, при температуре среды ниже 25С и наличии свободного хлора в воде коррозия NAB в достаточной степени контролируется, поскольку содержание 25Сг меняет поведение материала. Хлор предотвращает образование биопленки, снижая эффективность работы нержавеющей стали в качестве катода.

3.7 Коррозия. Обобщение

Основанные на более ранней работе (Oldfield and Masters, 1996) таблицы на рисунках 3 и 4 дают обобщенные данные по относительной коррозии рассматриваемых материалов. Шкала отсчета выбрана произвольно и имеет целью показать обобщенные характеристики разных материалов обозначенных под шапкой таблицы. Данные шкалы в таблицах следует использовать не как систему точного сравнения показателей (показатель 10 не означает улучшение в два раза по сравнению с показателем 5), а как систему ранжирования. Кроме показателей по коррозии добавлены показатели по истиранию и износу. Отличные качества NAB в данной области значительно облегчат жизнь конструкторам и пользователям вентиляей.

Приведенные данные скорее не определяют «материал-победитель», а демонстрируют сильные и слабые стороны рассматриваемых материалов. Показанные качества материалов нельзя рассматривать в отрыве от экономических показателей стоимости и предполагаемого срока службы

Шкала произвольная, Чем больше, тем лучше	Сплошная коррозия	Точечная коррозия	Щелевая коррозия	Эрозия	Кавитация	Механическая коррозия
Бронза						
Алюмоникелевая бронза						
Медно-никелевый сплав						
Углеродистая сталь						
Нержавеющая сталь						
Сплав 6Mo						
Дуплексный материал						
Супердуплексный материал						
Никелевый сплав 625						
Никелевый сплав C22						
Титан						

Рис. 3 Относительные показатели коррозионной стойкости, часть 1 (по данным Oldfield and Masters, 1996)

Шкала произвольная, чем больше, тем лучше	загрязненная морская вода	Коррозийная усталость	Устойчивость к обрастанию	Электрохимическая коррозия	Износ и истирание
Бронза					
Алюмоникелевая бронза					
Медно-никелевый сплав					
Углеродистая сталь					
Нержавеющая сталь					
Сплав 6Mo					
Дуплексный материал					
Супердуплексный материал					
Никелевый сплав 625					
Никелевый сплав C22					
Титан					

Рис.4 Относительные показатели коррозионной стойкости, часть 2 (по данным Oldfield and Masters, 1996)

4. Относительная стоимость

Стоимость материалов часто является определяющим фактором, потому сравнительный обзор материалов для клапанов не может быть полным без сравнения их стоимости. Однако, всякое сравнение по стоимости устаревает фактически сразу же после его публикации, поскольку цены на материалы определяются рынком и, как показывает опыт недавнего прошлого, быстро меняются.

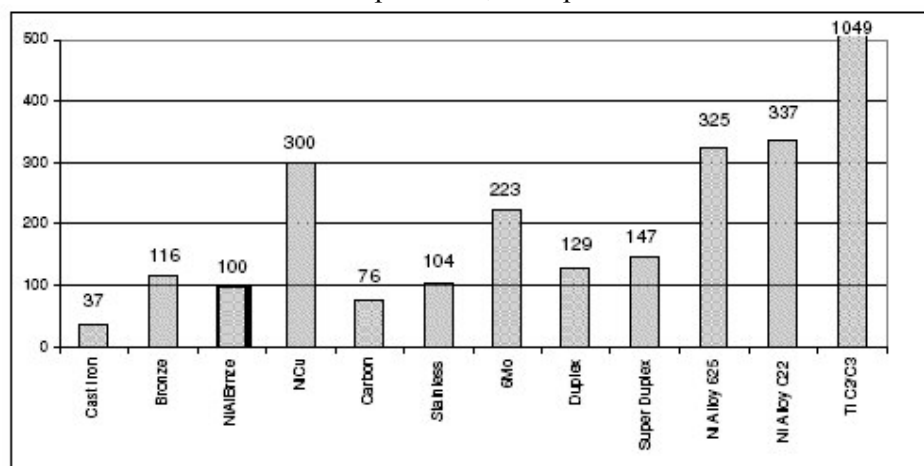


Рис.5 Относительная стоимость литейных материалов на единицу объема (показатель для NAV=100)

Приведенные сравнительные показатели даны просто для справки. Значения на рис.5 представляют собой сравнение сравнимых показателей. Параметры даны на базе небольшого количества однотипных клапанов среднего диаметра (например, корпуса 6 дюймовых задвижек). Цены за килограмм веса откорректированы с учетом плотностей соответствующих материалов для приведения к одинаковым объемам при каждом случае расчета. Все клапаны изготовлены согласно требованиям стандартов при минимальном сечении стенок и это приближает приведенные сравнительные оценки к

оценке реальной стоимости материалов, однако в расчет не приняты индивидуальные особенности конструкции деталей вентилях выполненных из различных по свойствам материалов. В приведенных данных не учтены экономические поправки на размер партии реализуемой продукции, присутствующие при больших объемах реализации изделий из наиболее распространенных материалов. Учтена составляющая контроля качества исходя, как правило, из стоимости одной плавки, что вносит зависимость от выплавляемого количества.

Плотность бронзы выше плотности NAB, поэтому бронза получается дороже, чем NAB, хотя цены за килограмм сходны. Нержавеющие стали тоже имеют большую плотность чем NAB, здесь такая же ситуация. Стоимость машинной обработки не учитывалась, хотя в общих чертах обработка сплавов 6Mo, дуплексных и супердуплексных, а также никелевых обходится дороже, чем обработка NAB.

Стоимость испытаний по контролю качества заметно влияет на стоимость материалов. Например, испытания материалов 6Mo, 22Cr, 25Cr, Shell ES/247 включают следующие виды контроля: испытания на ударпрочность (кроме 6Mo), определение твердости, исследование микроструктуры и контроль ферритной фазы (кроме 6Mo), контроль точечной коррозии, для сплава 25Cr контроль растрескивания механической коррозии. Кроме этого еще и контроль проникающим красителем и рентгеноскопия проводимые, возможно, на всех видах материалов. Указанные испытания необходимы для уверенности в полном контроле процесса литья и невозможности возникновения структурных дефектов.

Для материала NAB может быть задана термообработка, способствующая уверенности в сохранении полученных при литье оптимальных антикоррозионных параметров, при этом специальные виды дополнительных испытаний обычно не требуются.

Основной вывод по анализу аспектов затрат состоит в следующем: повышенная прочность не означает уменьшение объема материала если полностью выполнять требования конструктивных нормативов; стоимость контроля качества является важным компонентом, который не следует игнорировать.

5. Стандарты и NAB

Стандарты по-прежнему относят материал NAB к бронзе и определяют для него параметры как для бронзы. В соответствии с вышесказанным оба этих материала сильно различаются по механическим свойствам, но эти различия не учитываются стандартами на вентили и фланцы. В общем случае все стандарты на фланцы и вентили можно разделить на две группы в соответствии с приведенной ниже таблицей:

Происхождение	Стандарты	Материалы	Охват	Давление деформации в холодном состоянии, бар
США	ASME B16.24 EN1759-3:2003 (ISO 7005-3)	B62, B61 C95200 различные медные сплавы	Class 150,300 FF 150: 12" max 300: 8" max B16.5 R/F Class 150,300 FF to DN900 (150) or DN600 (300)	Cl150=15.5 bar,300=34.5 Cl150=13.4 bar, 300=35.5 Cl150=15.5 bar,300=34.5 Cl150, >DN350 14 bar Cl300, >DN250 20 bar
Европа	EN 1092-3:2003 (ISO 7005-3)	различные медные сплавы	PN6 – PN40 плоский фланец или фланец с выступом DN500 (PN16) DN400 (PN40)	PN x = x bar, PN16 = 16 бар и т.д.

Стандарты EN предусматривают наличие номинального значения параметра давления-температуры для NAB (CC333G) и увеличивают диапазон рабочих температур для NAB, однако совершенно игнорируют увеличенный более чем в два раза по сравнению с бронзой предел текучести материала NAB.

Американский стандарт B16.24 распространяется на алюминиевую бронзу, для которой значения размеров даны в соответствии со стандартом B16.5. Алюминиевая бронза уступает по прочности материалу NAB на 40% и превышает значение прочности заложенное в стандарте B62 на 80%. Однако и здесь для фланцев с выступом даны размеры предусмотренные стандартом B16.5, объясняя это уменьшением величины давления деформации в холодном состоянии. Параграф стандарта допускающий возможность изготовления из бронзы фланцев с выступом при условии увеличения толщины фланца кажется несовместимым с двумя вышеуказанными параметрами.

Европейские стандарты PN предусматривают размеры как для плоских фланцев, так и для фланцев с выступом вместе с полным набором показателей параметра «номинальное давление» (PN) вне зависимости от материала. Ввиду слабой прочности материала и низкой устойчивости к деформациям на изгиб требуется быть особо осторожным, выбирая «бронзовые» материалы для фланцев с выступом, особенно там, где предусмотрены соединения на болтах. Критически важным является и выбор уплотнения и технологии сборки предусматривающей контроль усилия затяжки болтов. Автор рекомендует повсеместно избегать применения бронзовых фланцев с выступом.

Ни в одном из стандартов не зафиксировано признание высокого значения предельного напряжения сдвига у материала NAB. Впрочем в приложениях к стандартам B16.34 и B16.5 все таки дается метод для определения параметров соотношения давления и температуры. Определяемое таким методом давление деформации в холодном состоянии для материала NAB равно 19 бар (см. Приложение III). Для расчета этого давления при повышенных температурах требуется знать свойства материала. Ниже на рис.6 даны значения параметра SPT01 (зависимость давление-температура по Shipham)

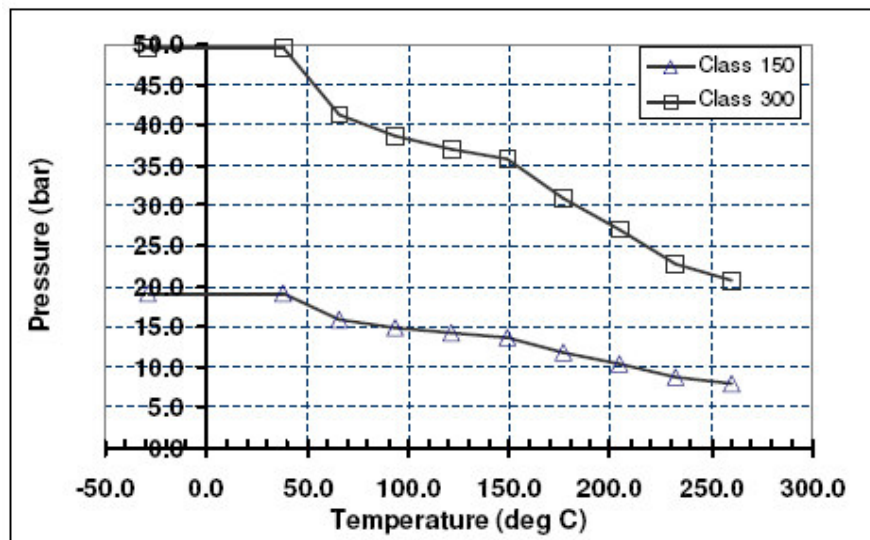


Рис.6 Значения параметра SPT01 для материала NAB (UNS C958000 и аналоги)

Temperature (deg C)- температура, °C;

class 150- класс 150;

Pressure (bar)- давление, бар

Указанный параметр используется Shipham уже много лет без проблем, он совместим со стандартом B16.34 и позволяет использовать потенциал по свойствам материала NAB на безопасном максимуме. Можно представить, что верхний предел рабочих температур для NAB можно продлить, но это не требуется по опыту и характеристикам областей применения NAB.

Аналогичный подход нужен и для других материалов, особенно титана. Данные по титану легче получить, потому что он, в отличие от NAB, заложен в стандартах ASME II.

6. Заключение

Материал NAB имеет значительные преимущества. Он особенно пригоден для эксплуатации в морской воде, где реализуются его антикоррозийные качества и в частности устойчивость к вызываемой хлорными соединениями точечной коррозии. Технология производства отливок из этого материала проста и понятна и почти не требует применения повсеместного неразрушающего контроля материала, в отличие от сплава 6Mo или дуплексных и супердуплексных сталей.

По механическим свойствам NAB совместим с другими широко распространенными устойчивыми к коррозии сплавами, но для полной реализации его преимуществ необходимо следовать рекомендованным значениям параметров зависимости давление-температура. Отличные показатели по износу и истиранию обеспечивают сохранение функциональных характеристик при длительном сроке службы вентилях изготовленных из материала NAB.

Недостатки присущие материалу NAB заключаются в нежелательности его эксплуатации в среде с наличием сернистых соединений, а также в необходимости учитывать ограничения по скорости потока среды. Альтернативные материалы, такие как чугун и сталь требуют применения защитного покрытия, и в этом случае качество и долговечность такого покрытия определяет в конечном итоге срок службы этих материалов. Нержавеющая сталь подвержена воздействию в морской воде интенсивной точечной и щелевой коррозии, а сплав 6Mo, дуплексные и супердуплексные нержавеющие стали требуют ограничения по температуре морской воды не выше 20C при максимальном содержании свободного хлора. Более высоко легированные редкие сплавы имеют критически высокую стоимость для оправдания которой требуются особые причины.

При всех изменениях рыночных цен на материалы материал NAB, несмотря на недавнее повышение цены на медь, остается экономически эффективным материалом для вентилях эксплуатируемых в морской воде. Совместимость материала вентилях с материалом трубопровода вероятно остается фактором влияющим на выбор материала вентилях, но преимущества NAB судя по всему перевешивают этот недостаток.

Выражение благодарности

Автор выражает благодарность Carol Powell, металлургу и консультанту Cooper Development Assocation www.cda.org.uk за комментарии и предложения позволившие выполнить некоторые усовершенствования.

Автор

Автор в настоящее время является техническим директором Shipham Valves, Hull, England. Адрес для переписки rons@shipham-valves.com

Приложение I. Сплавы

Наименование	Стандарт	Сорт	Универсальная система обозначений металлов и сплавов	Другие названия
Чугун	Various			
Бронза	B62		C83600	пушечная бронза, клапанная бронза, свинцовая бронза
Алюмоникелевая бронза	B148	M35-1	C95800	NAB
Медноникелевый сплав	A494	WCB	N24135	Сплав
Углеродистая сталь	A216	CF8M	J03002	
Нержавеющая сталь	A351	CK-	J92600	316
Сплав 6Мо	A351	3MCuN	J93254	
Дуплексный	A890	4A	J92205	
Супердуплексный	A744	CD-	J93370	
Никелевый сплав	A494	4MCu	N26635	сплавы Инконель
625	A494	CW-6MC	N26022	сплавы Хастеллой
Никелевый сплав	B367	CX-2MW	R50400	
C22	B367	C-2	R50550	
Титан C2		C-3		
Титан C3				

Более подробная информация по некоторым из вышеуказанных материалов в Приложении II

Приложение II. Технические данные по материалам

MATERIAL & SPECIFICATION	UNS	ELEMENTS								E=120 kN/mm ² ρ=8.8 g/cm ³	TENSILE (min) ² (N/mm ²)	YIELD (min) ² (N/mm ²)	Elongation ² Brinell ² (%)	Pressure Temp. Rating	Class 150 Note: SPTxx are Shipham calculated values						
		Cu	Sn	Pb	Zn	Ni				N/mm ²	%	Brinell		CWP (bar)	250 °C	max bar	at °C				
GUNMETALS																					
B62	C83600	84.0	86.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	1.0	Cu min can be Cu+Ni	205	95	20	B16.34-2004	15.5	-	10.3	208		
BS1400 LG2	obsolete	Bal	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	2.0			200	100	13	B16.24-2001	15.5	-	10.3	260		
EN1982 CC491K		83.0	87.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	2.0	Cu inc. Ni	200	90	13	60	EN1759-3:2003*	15.5	10.7	10.3	260	
B61	C92200	86.0	90.0	5.5	6.5	1.0	2.0	3.0	5.0	1.0	Cu min can be Cu+Ni	235	110	24	B16.24-2001	15.5	10.6	9.6	288		
BS1400 LG4	obsolete	Bal	6.0	8.0	2.5	3.5	1.5	3.0	2.0		Sn + 5Ni=7% to 8%	250	130	16							
EN1982 CC492K		85	89	6.0	8.0	2.5	3.5	1.5	3.0	2.0	Cu inc. Ni + as above	230	130	14	65	EN1759-3:2003*	15.5	10.7	10.3	260	
NICKEL-ALUMINIUM BRONZES																					
		Cu	Al	Fe	Ni	Mn	Zn				E=110 kN/mm ² ρ=7.6 g/cm ³										
BS1400 AB2		Bal	8.8	10.0	4.0	5.5	4.0	5.5	3.0	0.5		640	250	13							
EN1982 CC333G		76.0	83.0	8.5	10.5	4.0	5.5	4.0	6.0	3.0	0.5	600	250	13	140	EN1759-3:2003*	15.5	12.7	10.3	350	
B148	C95800	79.0	8.5	9.5	3.5	4.5	4.0	5.0	1.5			585	240	15		see SPT01	19.0	8.2	7.9	260	
Various	AB2/958/955/CC333G															see SPT01					
Ni-Cu ALLOYS (MONEL®)																					
		Ni	Cu	Si	Fe	Mn					E=179 kN/mm ² ρ=8.8 g/cm ³										
BS3071 NA1		Rem	28.0	34.0	3.5	1.5	1.5	1.5				430	170	20							
BS3071 NA3		Rem	28.0	34.0	4.5	1.5	1.5					630	250	250							
A494 M35-1	N24135	Balance	26.0	33.0	1.3	3.5	1.5			(N04400)		450	170	25		(3.4)	15.9	12.1	3.7	475	
A494 M35-2	N04020	Balance	26.0	33.0	2.0	3.5	1.5			(N04400)		450	205	25		(3.4)	15.9	12.1	3.7	475	
STAINLESS STEELS																					
		Cr	Ni	Mo	Cu	N	Mn	Si			E=200 kN/mm ² ρ=8.0 g/cm ³										
A351 CK-3MCuNi	J93254	20.5	19.5	19.5	17.5	7.0	6.0	1.0	0.2	1.2	1.0	C 0.02 max	550	260	35	155	2.8	20.0	12.1	6.5	400
AVESTA 254 SMO	S31254	20.5	19.5	18.5	17.5	6.5	6.0	1.0	0.2			C 0.02 max	650	300	35	210	(2.8)	20.0	12.1	6.5	400
A743 CN-3MN	(N08367)	20.0	22.0	25.5	23.5	6	7.0	0.75	0.2	2	1	C 0.03 max	550	260	35		3.12	17.8	12.1	5.5	425
A743 CN-7M	N08007	19.0	22.0	27.5	30.5	2	3.0	3.5	-	1.5	1.5	C 0.07 max, sim to N08020	425	170	35		3.17	15.9	10.4	9.3	325
B649 (forging)	N08904	19.0	23.0	23	28	4	5.0	1.5	-	2		C 0.02 max	500	220	35	180	3.11	19.7	12.1	7.4	375

² Figures in bold are mandatory in the standard.

Material & specification - Материал и спецификация

UNS - Универсальная система обозначений металлов и сплавов

Elements – элементы

Gunmetals - пушечные бронзы

Cu min can be Cu+Ni - минимальное содержание меди может быть Cu+Ni

Obsolete – устарело

NICKEL-ALUMINIUM BRONZES - алюмоникелевые бронзы

Ni-Cu ALLOYS (MONEL®) - медно-никелевые сплавы

Rem – остаток

Balance – баланс

STAINLESS STEELS - нержавеющие стали

SUPER AUSTENITIC - супер аустенитные

Forging – ковкий

Figures in bold are mandatory in the standard - цифры обозначенные жирным шрифтом относятся к обязательным

Sim – аналогично

Pressure Temp. Rating - номинальный параметр давление-температура

Class 150 Note: SPTxx are Shipham calculated values - класс 150. Примечание: значения

SPTxx – расчетные значения полученные Shipham

flat faced flanges only (similar materials) - только плоские фланцы

TENSILE (min) - Предел прочности, мин.

YIELD (min)² - Предел текучести, мин.

Elongation² Brinell 2 – Удлинение по Бринелю

MATERIAL & SPECIFICATION	UNS	ELEMENTS								E=200 kN/mm ²	TENSILE N/mm ²	YIELD %	Elongation Birnelli	Pressure Temp. Rating	Class 150 Note: SPTxx are Shipham calculated values							
		Cr	Ni	Mo	Cu	N	Mn	Si	CWP (bar)						250 °C	max bar	at °C					
DUPLEX																						
A890	4A	J92205	21.0	23.5	4.5	6.5	2.5	3.5	1.0	0.3	1.5	1.0	C 0.03 max	620	415	25	(2.8)	20.0	12.1	9.6	315	
A351	CD3M-WCuN	J93380	24.0	26.0	6.5	8.5	3.0	4.0	1.0	0.3	1.0	1.0	W 1.0,C.03, UNS S32760	700	450	25	(2.8)	20.0	12.1	9.6	315	
A744	CD-4MCu	J93370	24.5	26.5	4.8	6.0	1.8	2.3	3.0	-	2.0	1.0	Ferrarium,UNS S32550	690	485	16	2.8	20.0	12.1	9.6	315	
A789	SAF 2507	S32750	24.0	26.0	6.0	8.0	3.0	5.0	0.5	0.3	1.2	-				2.8	20.0	12.1	9.6	315		
NICKEL ALLOYS (1) (Inconel®, Incoloy®)																						
											E=196, 206 kN/mm ²											
											ρ=8.1, 8.4 g/cm ³											
B424	Incoloy	N08825	19.5	23.5	38.0	46.0	2.5	3.5	3.0	-	1.0	-	Fe bal,Ti 1.0 max	520	240	20	(3.8)	20.0	12.1	1.4	538	
A494	CU5MCuC		19.5	23.5	38.0	44.0	2.5	3.5	3.5	-	1.0	1.0	Fe bal,Ti 1.2 max	520	240	20	(3.8)	20.0	12.1	1.4	538	
A494	CW-6MC	N26635	20.0	23.0	bal		8.0	10.0	-	-	1.0	1.0	Fe 5 max, UNS N06625	485	275	25	(3.8)	20.0	12.1	1.4	538	
NICKEL ALLOYS (2) (Hastelloys®)																						
											E=217, 205 kN/mm ²											
											ρ=9.2, 8.7 g/cm ³											
A494	Ni-7M	J30007	0.0	1.0	bal		30.0	33.0	-	-	1.0	1.0	UNS N10665,B2	525	275	20	(3.7)	20.0	12.1	5.5	425	
A494	CX-2MW	N26022	22.0	22.5	bal		12.5	14.5	-	-	1.0	0.8	UNS N06022,C22	550	280	30	(3.8)	20.0	12.1	1.4	538	
TITANIUM																						
											E=110 kN/mm ²											
											ρ=4.4 g/cm ³											
B367	C-2	R50400	Bal	-	-		0.4	0.2	0.1	0.05			R52250	345	275	15	SPT02	16.2	8	7.7	260	
B367	C-3	R50550	Bal	-	-		0.4	0.25	0.1	0.05			R52250	450	380	12	SPT04	20.0	8.7	8.4	260	
B367	C-5	R56401	Bal	5.5	6.8		3.5	4.5	0.25	0.4	0.1	0.05		895	825	6	(not rec)					
ZIRCONIUM																						
											E=99 kN/mm ²											
											ρ=6.6 g/cm ³											
B752	702C	R60702	Bal	-	-		0.3							380	276	12	210	SPT03	17.8	8.8	5.9	370
B752	705C	R60705	Bal	2	3		0.3							552	379	12	235					

NICKEL ALLOYS (1) - никелевые сплавы

TITANIUM – титан

ZIRCONIUM – цирконий

CWP (bar) - давление деформации в холодном состоянии

250 oC max - 250C максимум

bar at oC - бар на градус Цельсия

Приложение III. Расчет параметра зависимости «давление-температура»

Ссылочный стандарт ASME B16.34-2004 Appendix B.

Предел прочности 85000 psi, предел текучести 35000 psi

S_1 - выбранное значение напряжения, является меньшим из следующих значений:

(1) $60\% \times \text{yield} = 60\% \times 35\,000 \text{ psi} = 21\,000 \text{ psi}$

(2) $1.25 \times 25\% \times \text{tensile} = 1.25 \times 25\% \times 85\,000 \text{ psi} = 26\,560 \text{ psi}$

Следовательно $S_1 = 21\,000 \text{ psi}$

Для класса 150 $p_r = 115$ and $C_1 = 1$

$$p_{st} = C_1 S_1 p_r / 8750$$

$$p_{st} = 1 \times 21\,000 \times 115 / 8\,750 = 276 \text{ psi}, 19 \text{ бар}$$

Приложение IV

Ссылки и список литературы