

The original article was published in Valve World, 2010, September, p. 75. The translation of the original English article was revised by T. Sklyarova, Trade House «Znamya Truda», JSC, St. Petersburg.

# Алюмоникелевая бронза для морской воды – достоинства познаются в сравнении

Ron Strang, Shiphams Valves<sup>1</sup>

Речь в этой статье пойдет об алюмоникелевой бронзе (АНБ). Заметьте: не об обычной бронзе, не об алюминиевой, а вот именно об алюмоникелевой. С данным материалом связан целый ряд мифов. Говорят, он весьма хрупок, — что, однако, вовсе не так, взгляните на *рис. 1*. Еще говорят, мол, он очень дорог. Но вновь обратимся к фактам — *рис. 2* — видите: в действительности всё немного иначе. Есть и другие мифы, например, «он недоступен», «его сложно лить», а также «его графики давление-температура не слишком хороши»... Но важнее всего — ценовая эффективность. Всегда приходится искать компромисс: то ли единожды всерьез потратиться, но зато решить проблему принципиально, то ли менять арматуру каждые несколько месяцев. В статье убедительно показано, что АНБ вполне годится на роль литейного материала для арматуры, работающей с морской водой.



*Ron Strang в 1981 г. закончил Астонский университет как инженер-механик, в 2007 г. университет в Халле как магистр. Работал конструктором арматуры первоначально в Serck Audco Valves, затем в Orseal Valves. Последние 16 лет занимает должность технического директора компании Shiphams Valves в Халле.*

## 1. Что такое алюмоникелевая бронза?

Алюмоникелевая бронза — это на самом деле вовсе не бронза. Единственное сходство двух этих материалов в том, что оба они представляют собой медные сплавы. Бронза, которая является соединением меди и олова, появилась еще в 4-ом тысячелетии до нашей эры (в Бронзовом веке). Алюминиевая бронза и АНБ открыты сравнительно недавно, поскольку требуют определенного уровня технологий литейного производства. Их получение стало возможным лишь в 1913, когда с помощью метода Дюрвиля<sup>2</sup> удалось разрешить проблемы дефектов усадки и оксидных включений, возникающих отчасти благодаря суженному интервалу температур кристаллизации сплава.

Распространению АНБ способствовало развитие нефтяной промышленности, которой нужны были пожарные насосы для морской воды. Материал этот также пользовался спросом у военно-морского флота благодаря его прочности и хорошей свариваемости. Гибель в 1963 году атомной подводной лодки США Thresher, которая произошла, как предполагалось, из-за дефекта бронзового литья, ускорила переход к применению АНБ на подводном флоте.

Выбор материалов для арматуры во многом определяется материалом трубопровода. Когда в 80-х годах вошли в практику медно-никелевые трубы, стало возможным применение совместимой с ними арматуры из АНБ. Правда, из-за ограничений по весу, прочности и скорости потока<sup>3</sup> продолжался поиск более современных материалов для труб. Впрочем, и у подобных материалов (дуплексных, супердуплексных сталей, титана) со временем обнаружились ограничения по температуре, цене и качеству. Позднее арматура из АНБ использовалась на трубах из эпоксидного стеклопласта (ПВП).

<sup>1</sup> Представителем Shiphams Valves в России является ЗАО «ЦТК ЕВРО», [www.ctkeuro.ru](http://www.ctkeuro.ru).

<sup>2</sup> Литье в наклоняемую форму.

<sup>3</sup> При скоростях свыше 3,5 м/с в медно-никелевых трубах начинается эрозия.



Рис. 1. Прочность отливок

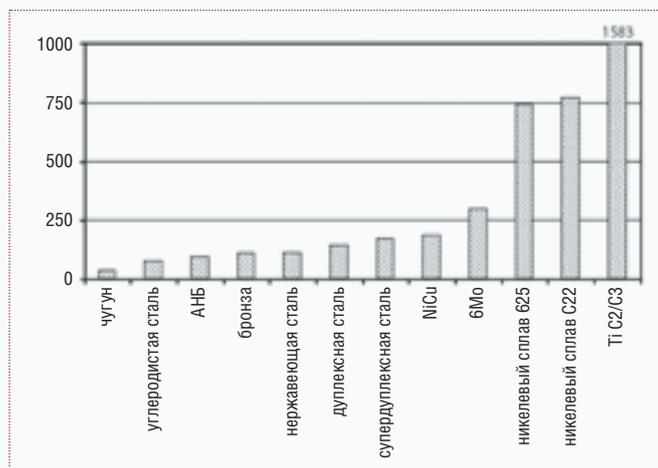


Рис. 2. Условные затраты на литье единицы объема (АНБ = 100)

Наиболее распространенный и пригодный для арматуры сплав АНБ содержит 8-11% алюминия с добавками железа и никеля для придания сплаву высокой прочности и коррозионной стойкости. Это двухфазный сплав, который применяется как в виде отливок, так и в виде поковок. Типичные литейные сплавы – это UNS C95800 (ASTM B148) и СС333G (EN 1982). Сплав АНБ хорошо поддается сварке, он жидкотекучий, имеет превосходную стойкость к коррозии, поскольку покрыт прочной оксидной пленкой. Его отличают прекрасные характеристики ударопрочности и износостойкости, он не искрит, его электро- и теплопроводимость также высоки. Достоинства и недостатки АНБ изучаются в этой статье в сравнении с характеристиками других материалов, часто применяемых для морской воды.

## 2. Относительная стоимость

При выборе материала решающим фактором часто бывает цена – от этого комплекса не избавиться – хотя каждый понимает, что есть еще и затраты при эксплуатации, да и расходы на материал – величина непостоянная (это, кстати, видно из *рис. 3*). На основе данных, приведенных

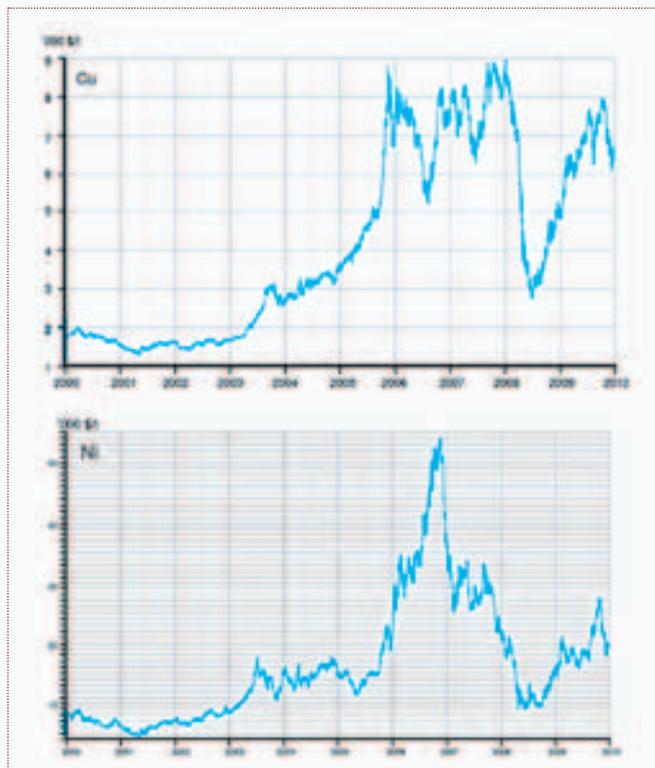


Рис. 3. Цены на никель и медь за последние 10 лет по данным Лондонской биржи металлов

на *рис. 2*, можно оценить сравнительную стоимость арматуры средних размеров из того или иного материала.

Для подтверждения качества различных материалов требуется проведение испытаний, в том числе методами неразрушающего контроля. Например, в соответствии с требованиями стандарта Shell DEP 30.10.02.35 для сталей 6Mo, дуплексной и супердуплексной необходимо провести следующие испытания:

- Испытание на ударную вязкость (кроме 6Mo);
- Испытание твердости;
- Исследование микроструктуры и анализ ферритной фазы (кроме 6Mo);

- Испытание на питтинговую (точечную) коррозию (и дополнительное испытание на коррозионное растрескивание под напряжением для стали 25Cr, если это специально оговаривается при заказе).

И все это в дополнение к цветной дефектоскопии и радиографическому анализу, проведение которых обязательно для всех материалов. Кроме того, необходимо убедиться, что процесс литья полностью проходил под контролем, и структура металла соответствует заданным требованиям. Совершенно очевидно, что по цене АНБ вполне конкурентоспособен, особенно если речь идет о цене по настоящему качественного материала.

## 3. Сопоставление коррозионной стойкости

Коррозия – тема непростая, тут играет роль масса факторов, включая точный химсостав металла, его микроструктуру и тип термической обработки. И далее все это усугубляется бесконечным разнообразием условий эксплуатации. Сама по себе рабочая среда является только одной из составляющих, кроме нее есть еще условия окружающей среды, давление, температура и расход, и другие не менее важные составляющие. Даже морская вода весьма различна по своим свойствам в зависимости от географического региона и биологической активности.

### 3.1. Общая коррозия

Для большинства рассматриваемых материалов общая коррозия не является проблемой, за исключением углеродистой стали и чугуна, требующих нанесения специального покрытия.

### 3.2. Питтинговая (точечная) и щелевая коррозия

Питтинговая (точечная) коррозия возникает в неподвижной морской воде в результате воздействия неоднородностей среды. По отношению к коррозии этого типа рассматриваемые материалы разнятся очень сильно, причем страдают от нее нержавеющие и дуплексные стали, но не АНБ. Материалы, подверженные воздействию морской воды, должны пройти испытания для выяснения критической температуры, вызывающей питтинговую коррозию, следует провести расчеты с целью оценки стойкости к питтинговой и щелевой коррозии в результате воздействия хлоридов на нержавеющие стали (эквивалентный показатель устойчивости к точечной коррозии указывает на восприимчивость к питтингу). Больше всего такой коррозии подвержены стали, но чем больше легирующих добавок, чем «выше» сплавы, тем меньше проблем. Следует отметить, что распространение точек питтинговой коррозии на дуплексных сталях может быть много обильнее, чем на сталях аустенитного класса, и что стойкость к питтинговой и щелевой коррозии дуплексной стали 22Cr по отношению к воде с высоким содержанием хлоридов очень низкая. Во избежание питтинговой коррозии дуплексных сталей необходимо принимать соответствующие меры. АНБ не подвержена питтинговой коррозии в среде хлоридов, стойкость к щелевой коррозии высока настолько, что не приводит к питтинговой коррозии или шероховатости поверхности. Кроме того, есть данные, подтверждающие отсутствие склонности к хлоридному коррозионному растрескиванию под напряжением.

Таблица 1а. Сравнительные данные коррозионной стойкости, часть I (по Oldfield and Masters, 1996)

Оценка по шкале, чем выше оценка, тем выше стойкость к коррозии	Общая коррозия	Питтинговая коррозия	Щелевая коррозия	Эрозия-коррозия	Кавитация	Коррозионное растрескивание под напряжением
Бронза	8	9	9	7	5	
АНБ	9	10	8	8	8	10
Сплав Ni-Cu	10	5	2	10	8	?
Углеродистая сталь	3	3			2	
Нержавеющая сталь	10	4	3	10	7	8
6Mo	10	9	8	10	8	8
Дуплексная сталь	10	5	4	10	8	9
Супердуплексная сталь	10	9	8	10	8	9
Сплав Ni 625	10	13	12		13	
Сплав Ni C22	10	14			10	
Титан	10	15	10		9	

### 3.3. Кинематика

Здесь имеются в виду эрозия-коррозия, кавитация и ударная коррозия при высоких скоростях потока, а также засорение морскими микроорганизмами при небольшом или нулевом течении.

Засорение случается, когда морские микроорганизмы налипают на металл, становясь при наличии дифференциальной аэрации зародышем коррозионных раковин. Медные сплавы имеют превосходную стойкость к такой коррозии благодаря образованию на поверхности пленки оксида меди, не восприимчивой к морским микроорганизмам. Сплав Ni-Cu стоек к загрязнениям, другие же сплавы гораздо менее стойки.

С возрастанием скорости растет поток кислорода, воздействующего на поверхность металла, что может сильно отразиться на темпах коррозии. Гальванизация способна продлить невосприимчивость к коррозии углеродистой стали только на шесть месяцев. Более высокие скорости потока, особенно при условии, что рабочая среда содержит абразивные частицы, могут попросту уничтожить оксидную защитную пленку. Такое случается с медными сплавами, для которых ограниченные скорости поэтому —  $4,3 \div 5,0$  м/с, в то время как для АНБ предел составляет до 10 м/с в условиях пульсирующего потока.

### 3.4. Температура

Как правило, температура увеличивает скорость химической реакции, значит, и процесс коррозии будет развиваться быстрее. Однако, чем выше температура, тем меньше содержание кислорода, что может иметь противоположный эффект. Реальная скорость коррозии зависит от соотношения этих двух факторов, что существенно при оценке щелевой коррозии нержавеющей и дуплексной сталей, для которых рекомендуемая температура ограничивается  $20^\circ\text{C}$ , — а именно для сталей 6Mo, 22Cr и 25Cr, предназначенных для работы в морской воде.

### 3.5. Гальваническая коррозия

Гальваническая (электрохимическая) коррозия возникает при электрическом контакте двух разных металлов через электролит, каковым является, допустим, морская вода. Активность коррозии пропорциональна разности электрохимических потенциалов элементов гальванической пары. По этой причине материал арматуры определяется в зависимости от выбранного материала трубопровода так, чтобы их электрохимические потенциалы были как можно ближе.

В целом, АНБ — более «анодный» (химически активный) материал, нежели другие рассматриваемые (кроме углеродистой стали, чугуна и бронзы), и потому, вероятнее

Таблица 1б. Сравнительные данные коррозионной стойкости, часть 2 (по Oldfield and Masters, 1996)

Оценка по шкале, чем выше оценка, тем выше стойкость к коррозии	Загрязненная морская вода	Коррозионная усталость	Стойкость к загрязнению	Гальваническая коррозия	Износ и фрикционная коррозия
Бронза			10	5	10
АНБ	4	9	8	6	10
Сплав Ni-Cu	?	?	4	8	5
Углеродистая сталь				1	8
Нержавеющая сталь	4	6	1	4/7	6
6Mo	9	6	1	9	5
Дуплексная сталь	5	9	1	8	4
Супер дуплексная сталь	9	9		10	3
Сплав Ni 625		12	1	10	3
Сплав Ni C22			1	10	3
Титан			1	9	2

всего, будет корродировать в контакте с другими материалами. Но возможен и полезный эффект: можно использовать сплав NiCu в качестве материала для узла затвора, а АНБ для корпуса – медноникелевый сплав в таком случае будет защищен от морской воды, а огромная площадь поверхности АНБ позволит пренебречь коррозией.

**3.6. Другие условия, вызывающие коррозию**

Наравне со многими другими материалами, АНБ подвержен коррозии в среде сероводорода. Его нельзя использовать в загрязненной морской воде, следует также принять определенные меры (например, пассивацию) при использовании в чистой морской воде, кроме того, желательно учитывать ограничения по скорости потока.

В целом, АНБ хорошо показывает себя в кислой среде, но если интенсивная щелочная среда разъест защитную пленку, коррозия может развиваться очень быстро.

**3.7. Выводы о коррозионной стойкости**

В табл. 1а и 1б приведены обобщенные данные о коррозионной стойкости рассматриваемых материалов. Использование ранжированной оценочной шкалы позволяет показать характеристики различных материалов друг относительно друга.

Задача стояла не выявить победителя, а определить сильные и слабые стороны различных материалов. Ни одно из приведенных свойств не может рассматриваться безотносительно стоимости и срока службы в заданных условиях эксплуатации.

**4. Механические свойства**

Рис. 1 демонстрирует отличие бронзы от АНБ, предел текучести которого вдвое превышает предел текучести бронзы. Механические свойства АНБ намного лучше даже, чем у сплава Ni-Cu (Monel®). Единственными материалами, значительно отличающимися по механическим свойствам от АНБ в лучшую сторону, являются дуплексные и супердуплексные стали. Хотя пластичность АНБ не так высока, как у большинства рассматриваемых материалов, она сравнима с титаном, и при 15% относительном удлинении вряд ли можно назвать АНБ хрупким материалом. Стандарты на арматуру устанавливают для каждого материала свои графики зависимости допустимого рабочего давления от температуры. На рис. 4 приведены значения рабочего давления при низкой температуре для некоторых материалов<sup>4</sup>. Данные для бронзы и чугуна относятся только к фланцам с плоской поверхностью, для остальных материалов – к фланцам с выступом. Зависимость давления от температуры для АНБ и титана рассчитывалась специально.

<sup>4</sup> В английском языке существует устойчивый термин CWP (Cold Working Pressure) – «максимально допустимое давление при низкой температуре». «Низкой» считается температура от -20 до 100° F, что соответствует примерно от -30 до 40° C.

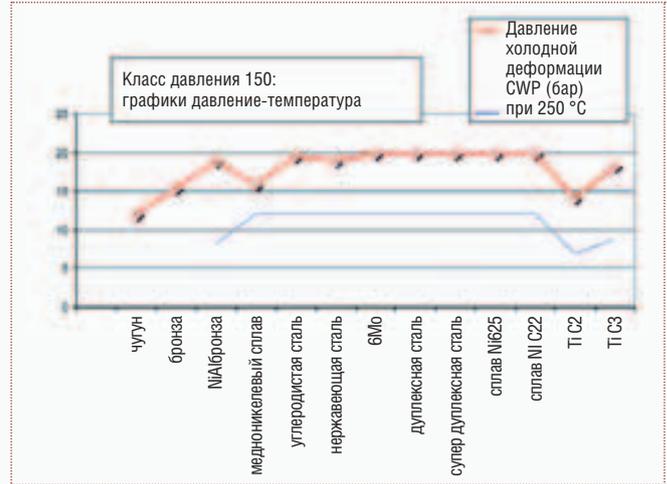


Рис. 4. Сравнение графиков давление-температура

Разница между свойствами материалов сглажена, так как сам способ получения данных предполагает наличие определенного предела налагаемого давления, дабы ограничить деформации при исследовании более прочных материалов.

АНБ достаточно прочен, он сравним с конкурирующими металлами. Да, есть ограничения по температуре, но они не столь актуальны для работы с морской водой.

**5. Стандарты и АНБ**

В стандартах АНБ рассматривается как разновидность бронзы. Это очень приблизительный подход, далеко не полностью раскрывающий возможности АНБ. Применяемые стандарты приведены в табл. 2.

Стандарты США (ASME) распространяются на бронзу, класс давления 150 или 15.5 бар. Европейские стандарты (EN) ранжируют фланцы по номинальному давлению и затрагивают все медные сплавы. В стандартах EN зависимость давления от температуры для АНБ (СС333G) приводится, однако для высоких температур, за пределами максимума для бронзы, нет данных по пределу текучести, который превышает предел текучести бронзы более чем вдвое.

Стандарты EN распространяются как на плоские фланцы, так и на фланцы с выступом на полный параметрический ряд PN безотносительно к материалу. (Вследствие мягкости бронзы в условиях соответствующих изгибающих моментов автор рекомендует по возможности избегать фланцев с выступом из нее.) Высокий предел

Таблица 2. Краткое изложение стандартов

Источник	Стандарты	Материалы	Охват по объему информации	Давление (максимальное рабочее давление CWP, бар)
США	ASME B 16.24 EN1759-3:2003 (ISO 7005-3)	B62, B61 C95200 Различные медные сплавы	Класс давления 150, 300 плоские фланцы 150: 12" макс. 300: 8" макс V16.5 фланцы с выступом Класс давления 150, 300 плоские фланцы до DN 900 (класс давления 150) или DN 600 (класс давления 300)	Класс давления 150=15.5 бар, 300=34.5 Класс давления 150=13.4 бар, 300=35.5 Класс давления 150=15.5 бар, 300=34.5 Класс давления 150, >DN 350 14 бар Класс давления 300, >DN 250 20 бар
Европа	EN 1092-3:2003 (ISO 7005-3)	Различные медные сплавы	PN 6 – PN 40 плоские фланцы или фланцы с выступом DN 500 (PN 16) DN 400 (PN 40)	PN x = x бар, PN16 = 16 бар, и т.д.

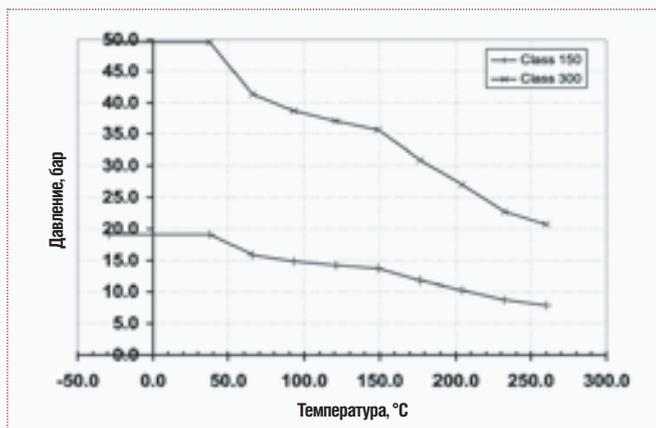


Рис. 5. SPT01, графики зависимости допустимого рабочего давления от температуры для АНБ (UNS C95800 и аналоги)

текущего АНБ не приведен ни в одном стандарте. Приходится проводить специальные расчеты. Методики проведения расчетов приведены в приложениях стандартов В 16.34 и В 16.5. Согласно этим документам получается, что допустимое рабочее давление АНБ при низкой температуре равно 19 бар. Чтобы определить давление при более высокой температуре, необходимо иметь данные о свойствах материала. Графики зависимости давления от температуры «SPT01», рассчитанные фирмой Shiphams Valves, приведены на рис. 5. Эти данные используются в течение многих лет без корректировок. Они согласуются с требованиями В 16.34 и дают возможность с максимальной безопасностью использовать АНБ для фланцев с выступами. Подобный подход также необходим и к другим материалам, не приведенным в В 16.5 и В 16.10, особенно к титану. Данные о титане более доступны, так как титан, в отличие от АНБ (C95800), приведен в стандартах ASME II.

## 6. Заключение

Так или иначе, материал арматуры определяется исходя из требования его совместимости с материалом трубопровода. Это ограничивает использование АНБ. Данный материал применяется для арматуры, когда используются трубы из CuNi или пластмассы, армированной стекловолокном, или эпоксидные трубы, усиленные стекловолокном. По механическим свойствам АНБ сравним с другими популярными коррозионностойкими сплавами, но чтобы увидеть все преимущества его механических свойств, приходится пользоваться специально выведенными графиками давление-температура.

Алюмоникелевая бронза — экономически эффективный материал, имеющий коррозионную стойкость значительно выше, чем низкопробные углеродистые и нержавеющие стали, при этом нет необходимости в переплате за высоколегированные стали. АНБ наиболее пригодна для условий эксплуатации, связанных с морской водой, поскольку демонстрирует превосходную коррозионную стойкость, особенно к питтинговой коррозии в хлорсодержащей среде. Материал позволяет использовать современные литейные технологии для изготовления отливок высокого качества, при этом не требуется повсеместных неразрушающих методов контроля, проведение которых необходимо для сталей 6Мо, дуплексной и супердуплексной. Единоразово используя алюминикелевую бронзу, развеете все мифы, вам станут очевидны все ее преимущества. Особенно ярко преимущества алюминикелевой бронзы в применении для морской воды видны, если сравнивать ее с другими материалами, используемыми для подобных условий. Действительно, достоинства АНБ познаются в сравнении.

• новости • события • факты •

## ПРЕСС-РЕЛИЗ



### Волгограднефтемаш поставит Газпрому арматуру в новой комплектации

В конце декабря в адрес ООО «Газпром трансгаз Югорск» будут отгружены два шаровых крана диаметром 1400 мм с приварными переходными кольцами для подземной установки на Ямбургский магистральный газопровод. Шаровые краны в такой комплектации ОАО «Волгограднефтемаш» изготовило впервые. Это позволит заказчику производить установку кранов напрямую в трубопровод без приварки катушек в монтажных условиях.

Свидетельство о готовности ОАО «Волгограднефтемаш» к использованию аттестованной технологии сварки переходных колец к трубопроводной арматуре было выдано летом текущего года. Кроме того, одновременно



с аттестацией предприятием была разработана и согласована с Газпромом «Инструкция по сварке и контролю качества сварных соединений колец переходных с трубопроводной арматурой», что является одним из основных документов при производстве кранов с переходными кольцами, в том числе на газопровод «Бованенково-Ухта».

Теперь шаровые краны с приварными кольцами (катушками) на ОАО «Волгограднефтемаш» будут выпускаться серийно и поставяться на объекты отечественной газотранспортной системы.

Служба по связям с общественностью и рекламе:  
(8442) 40-71-82; pr@vnm.ru, http://www.vnm.ru