

Особенности коррозионных процессов бронз и латуней и их влияние на эксплуатационные характеристики элементов систем водоснабжения, кондиционирования и отопления

Рецензия эксперта на статью получена 10.02.2025 [The expert review of the article was received on February 10, 2025]

Введение

Эксплуатация трубопроводов, соединительных деталей и запорной арматуры систем водоснабжения, кондиционирования и отопления связана с коррозионным воздействием жидких сред — воды, водных растворов, содержащих солевые компоненты, а также различных смесей гликолей [двухатомных спиртов с общей формулой $C_nH_{2n}(OH)_2$, используемых как антифризы]. Коррозия таких трубопроводных систем чаще всего связана с развитием электрохимических процессов, определяемых разницей потенциалов на поверхности металла и возникновением электрического тока, протекающего в жидкой среде (электролите). При этом отдельные участки внутренней поверхности трубопровода образуют своеобразный гальванический элемент, по своей функциональности напоминающий батарейку, работа которой и приводит к возникновению коррозионных разрушений. На активность развития коррозионных процессов в водопроводах, системах отопления и кондиционирования оказывает влияние значительное число факторов: выбор материалов для труб и соединительных деталей, совместное использование стальных труб и соединительных элементов из цветных металлов, состав контактирующих жидких сред, температурный режим, а также изменение ионного состава среды при наличии систем водоподготовки и др. Неправильный учёт взаимного влияния этих факторов может приводить к развитию интенсивной коррозии, локальным язвенным коррозионным разрушениям, появлению трещин и формированию отложений (рис. 1).

Данная работа направлена на определение факторов, оказывающих влияние на долговечность материалов, применяемых для систем водоснабжения, отопления и кондиционирования.

В последние десятилетия перечень материалов, применяемых в системах водоснабжения, отопления и кондиционирования, существенно расширился. Значительное место в нём заняли сплавы на основе меди, в том числе бронзы и латуни

Медные сплавы для систем водоснабжения, отопления и кондиционирования

Традиционно для систем бытового водоснабжения и отопления использовались стальные трубы, а также широкое применение нашли шаровые краны и фитинги из цветных металлов. Как правило, выбор материалов для таких трубопроводов в первую очередь определялся экономическими показателями — во главу угла ставилась минимизация стоимости системы. Поэтому наиболее широко применяемыми марками сталей являлись не легированные низкоуглеродистые стали. Однако в последние десятилетия перечень материалов, применяемых в системах водоснабжения, отопления и кондиционирования, существенно расширился. Значительное место в нём заняли сплавы на основе меди, к которым относятся бронзы и латуни. Несмотря на то, что эти группы материалов имеют общую медную основу, их эксплуатационные характеристики существенно различаются. В чистом виде медь обладает высокой электро- и теплопроводностью, однако имеет сравнительно невысокий комплекс прочностных свойств. Для изменения и улучшения исходных характеристик чистой меди её легируют путём добавления в расплав других металлов в заданных количествах. В результате формируется система легирования, которая определяет отнесение медного сплава к латуням или бронзам.

УДК 620.193.2. Научная специальность: 2.1.4.

Особенности коррозионных процессов бронз и латуней и их влияние на эксплуатационные характеристики элементов систем водоснабжения, отопления и кондиционирования

О. Ю. Елагина, д.т.н., профессор, заведующая кафедрой трибологии и технологии ремонта нефтегазового оборудования; **Ю. С. Дубинов**, к.т.н., доцент, доцент кафедры металловедения и неметаллических материалов, Российский государственный университет (РГУ) нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (г. Москва)

В работе представлено описание коррозионных процессов медных сплавов, влияние легирующих компонентов и соседствующих материалов на стойкость к электрохимической коррозии.

Ключевые слова: материаловедение, системы водоснабжения, отопления и кондиционирования, медь, латунь, бронза, легирование, электрохимическая коррозия, избирательная коррозия, язвенная коррозия, коррозионное растрескивание, коррозионная стойкость, CR-латуни, DZR-латуни, CW602N, бронза CC470K.

UDC 620.193.2. Scientific specialty number: 2.1.4.

Features of corrosion processes of bronzes and brasses and their influence on the operational characteristics of elements of water supply, heating and air conditioning systems

O. Yu. Elagina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Tribology and Oil and Gas Equipment Repair Technology; **Yu. S. Dubinov**, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metallurgy and Non-Metallic Materials, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Moscow)

The paper describes the corrosion processes of copper alloys, the effect of alloying components and adjacent materials on resistance to electrochemical corrosion.

Keywords: materials science, water supply, heating and air conditioning systems, copper, brass, bronze, alloying, electrochemical corrosion, selective corrosion, ulcerative corrosion, corrosion cracking, corrosion resistance, CR-brass, DZR-brass, CW602N, CC470K bronze.



Рис. 1. Типовые разрушения элементов систем водоснабжения, отопления и кондиционирования (а — отложения, б — растрескивание, в — язвенная коррозия, г — контактная коррозия)

Основным металлом системы легирования латуней является цинк. По сообщениям Аристотеля (IV век до н.э.), первую разновидность латуни выплавляли умельцы из племенного союза моссинойков, жившие на побережье Черного моря к западу от Трапезунда. По более поздним описаниям моссинойская медь отличалась чрезвычайным блеском и белизной. Позже латунь получали путём сплавления меди с цинковой рудой (галмеем) и древесным углём, а начиная с 1781 года — путём прямого сплавления меди и цинка. Содержание цинка в латунях может достигать до 42–45 %. В настоящее время перечень металлов, входящих в систему легирования латуней, существенно расширен.

Составы некоторых марок латуней, применяемых для труб, кранов и фитингов систем отопления и кондиционирования, например, CW617N и CW602N-DZR, приведены в табл. 1.

Повышение прочностных свойств меди достигалось добавками в её состав олова (Sn). Химический анализ древнейших бронзовых предметов, найденных при археологических раскопках под развалинами дворцов и языческих храмов крупнейших городов древности в Ниневии, в Египте, на острове Кипр, показал, что содержание олова в них было весьма низкое и не превышало 1,5 %. Бронзовые предметы более позднего происхождения уже содержат от 4–5 до 15–16 % олова,

а в зеркалах из полированной бронзы — даже до 32 % Sn. Одно из самых ценных свойств оловянистых бронз — их чрезвычайно высокая стойкость против коррозии. Химическая стойкость бронзы в некоторых случаях превосходит даже стойкость серебра. Так, например, в середине 1960-х годов на дне итальянского озера Нэми (30 км к югу от Рима) были найдены остатки увеселительных галер римского императора Калигулы (I век н.э.), на которых серебряные приспособления вследствие коррозии практически исчезли, а бронзовые крепления не пострадали. Применяемые в настоящее время оловянистые бронзы содержат до 8–10 % Sn. Развитие металлургии привело к созданию широкой линейки марок не только оловянистых бронз, но и безоловянистых с легированием алюминием, свинцом, кремнием и рядом других металлов.

Составы бронзовых сплавов CC499K и CC470K приведены в табл. 2.

Факторы, вызывающие коррозию в системах водоснабжения, кондиционирования и отопления

Коррозионная стойкость сплавов, используемых для элементов трубопроводов, зависит от относительного электродного потенциала базового металла, формирующего сплав, и способности сплава к пассивации под воздействием контактирующей среды.

Согласно открытию итальянского физика Алессандро Вольта, все металлы формируют так называемый «электрохимический ряд активности» (ряд напряжений), в котором они расположены по мере увеличения разности потенциалов между металлом и раствором, выраженной в вольтах. Скачок потенциала на границе раздела фаз «металл — водный раствор его соли» может служить мерой окислительно-восстановительной способности системы, определяющей теоретическую способность к развитию коррозионных процессов. Так как абсолютное значение электродных потенциалов металлов экспериментально определить невозможно, то для оценки активности металла используют относительные значения электродных потенциалов, определяемые относительно некоторого «электрода сравнения».

В справочной литературе часто в качестве электрода сравнения рассматривают водородный электрод, принимаемый за нулевой уровень. При этом потенциалы металлов могут быть как больше, так и меньше потенциала стандартного водородного электрода, они могут иметь по водородной шкале как положительный, так и отрицательный знак.

Марки латуней, применяемые для фитингов

табл. 1

Марка по EN 12449 [1]	Аналог по ГОСТ 15527–2004	Химический состав, %						
		Cu	Zn	Pb	As	Fe	Mn	Прочие
CW617N	ЛС58-2	57–59	39–40	1,6–2,2	–	< 0,3	< 0,3	Sn < 0,3, Al < 0,05
CW602N-DZR	–	61–63	34–37	1,7–2,8	0,02–0,15	< 0,1	< 0,1	–

Марки бронз, применяемые для фитингов

табл. 2

Марка	Аналог по ГОСТ 613–79	Химический состав, %							
		Cu	Sn	As	Zn	Se, Te	Pb	P, S	Прочие
CC499K (CuSn5Zn5Pb2-C) EN 1982 [2]	БрО6Ц6С3 (ГОСТ 613–79)	основа	< 4	< 3	< 2	< 1	–	< 0,45	Sb < 0,1, Ni < 0,4, Pb < 0,3
CC470K DIN SPEC 2701 [3]	БрОЦ4-3 (ГОСТ 5017–74)	84–88	4–6	< 0,03	4–6	–	< 3	< 0,04	Sb < 0,1, Ni < 0,6, Pb < 0,3, Fe < 0,3

Например, железо, составляющее основу сталей, имеет значение стандартного электродного потенциала $-0,44$ В, а медь, являющаяся базовым металлом для бронз и латуней, обладает электродным потенциалом $+0,34$ В.

Величина стандартного электродного потенциала металла может рассматриваться как теоретическая мера его коррозионной активности в воде и водных растворах. Стандартный электродный потенциал воды, например, с $pH = 7$ в первом приближении можно оценить по формуле Нернста как:

$$E_{H_2O/H_2} = 0,059 pH = -0,059 \times 7 = -0,413 \text{ В.} \quad (1)$$

Чем меньше алгебраическая разница между потенциалом металла и потенциалом воды — электродвижущая сила (ЭДС) реакции, тем ниже его коррозионная активность и выше восстановительная способность:

$$\Delta E = E_{H_2O/H_2} - E_{Me^{n+}/Me}. \quad (2)$$

Сравнение теоретической активности железа и меди в водной среде (при $pH = 7$) показывает, что активность железа существенно превышает активность меди:

$$\begin{aligned} \Delta E_{Cu} &= -0,413 - (+0,34) = -0,753 \text{ В;} \\ \Delta E_{Fe} &= -0,413 - (-0,44) = +0,027 \text{ В.} \end{aligned}$$

Отрицательное значение электродвижущей силы реакции для меди в воде делает данную реакцию невозможной, в то время как железо (Fe) имеет положительное значение ЭДС реакции и способно окисляться в водной среде.

Показанные выше расчёты характеризуют теоретическую активность железа и меди к протеканию коррозионных процессов. При практическом применении сталей, бронз и латуней в системах водоснабжения и отопления на характер протекания окислительно-восстановительных реакций оказывает влияние большое число факторов.

Важным фактором, способным принципиально изменить ход окислительно-восстановительных реакций при протекании коррозионных процессов, является характер формируемых на поверхности металла плёнок, состоящих из продуктов реакции. Необходимым условием для активного протекания коррозионного процесса является растворимость продуктов реакции металла в данной реакционной среде. В случае образования малорастворимых соединений они пассивируют поверхность металла, формируя более или менее плотную плёнку отложений, и реакция металла с едкой средой прекращается или протекает крайне медленно.

Например, алюминий имеет очень низкий стандартный электродный потенциал $E_{Al(OH)_3/Al} = -1,88$ В и должен активно реагировать с водой, но этого не происходит из-за наличия на поверхности металла прочной, нерастворимой в воде оксидной плёнки.

Разница стандартных электродных потенциалов сталей и цветных металлов может стать причиной интенсивной коррозии при их совместном применении в трубопроводных системах.

Согласно СП 40-108-2004 (пп. 9.6 и 9.7) [4], в системах водоснабжения и отопления при применении элементов, выполненных из разнородных металлов, следует соблюдать ряд правил:

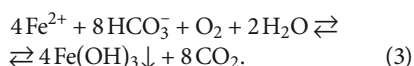
1. Не использовать стальные, алюминиевые или цинковые элементы трубопроводов после установки медных фитингов (по направлению движения потока воды в системах водоснабжения).

Разница стандартных электродных потенциалов сталей и цветных металлов может стать причиной интенсивной коррозии при их совместном применении в трубопроводных системах

2. Пары «медь — сталь», «медь — железо», «медь — цинк» в системах отопления следует разделять путём применения переходников из бронзы или нержавеющей стали, а также исключать попадание кислорода в теплоноситель.

3. В системах отопления из медных труб целесообразно применение отопительных приборов из меди, в том числе биметаллических (алюминиево-медных).

Протекание обменных реакций при неправильном использовании систем водоподготовки также может стать причиной коррозии элементов, изготовленных из разнородных металлов. Также использование угольных ионных фильтров может приводить к обогащению воды гидрокарбонатами, которые, попадая в стальной трубопровод, взаимодействуют с железом с выделением углекислого газа:



Наличие в воде углекислого газа при контакте с поверхностью медных фитингов и соединительных деталей вызывает переход ионов меди в раствор. Дальнейшее движение воды в отводящий стальной трубопровод сопровождается осаждением меди на поверхности стальных труб и вызывает интенсивную коррозию.

Коррозия бронз и латуней

Одним из наиболее значимых факторов повышения коррозионной стойкости сплава является его структура, формируемая за счёт специальной системы легирования и термической обработки. Введение в состав сплава легирующих элементов может оказывать как положительное, так и негативное влияние на устойчивость сплава к коррозии.

Чистая медь за счёт положительного значения стандартного электродного потенциала обладает достаточно хорошей коррозионной стойкостью, однако пассивирующая способность у неё выражена слабо. Поэтому в сильных окислительных средах, а также при активном доступе кислорода (аэрации) в воде и водных растворах её скорость коррозии может существенно возрастать. Введение в состав медного сплава элементов с более низким стандартным электродным потенциалом, но формирующих плотную и прочную оксидную плёнку, может способствовать росту его коррозионной стойкости.

Легирование меди оловом при получении оловянистых бронз позволяет несколько повысить коррозионную стойкость за счёт более низкого стандартного электродного потенциала олова ($+0,007$ В) по сравнению с медью ($+0,34$ В). При контакте с влажным воздухом и слабоагрессивными водными средами олово покрывается тонкой оксидной плёнкой, обладающей защитным действием [9, 10]. В атмосферных условиях, а также в условиях морского климата скорость коррозии бронз, содержащих от 5 до 8 % Sn, не превышает 0,002 мм/год.

Оловянные бронзы устойчивы к коррозии в атмосфере перегретого пара при температурах до 250 °С и давлении не выше 2 МПа, сухих газов: хлора, брома, фтора и их водородных соединений, а также окиси углерода, кислорода и четырёххлористого углерода [5, 6].

Вместе с тем при работе в более агрессивных средах коррозионная стойкость оловянных бронз снижается. Скорость коррозии таких бронз повышается в средах, в которых растворены минеральные кислоты, щёлочи, аммиак, цианиды, железистые и сернистые соединения кислот вод [5, 6]. Для работы в более коррозионно-агрессивных средах бронзу легируют кремнием, алюминием и никелем. Наибольшей коррозионной стойкостью обладают кремнистые и алюминиевые бронзы, которые способны образовывать в кислых средах оксидные плёнки на основе SiO_2 и Al_2O_3 . Повышенное содержание свинца понижает коррозионную стойкость бронз.

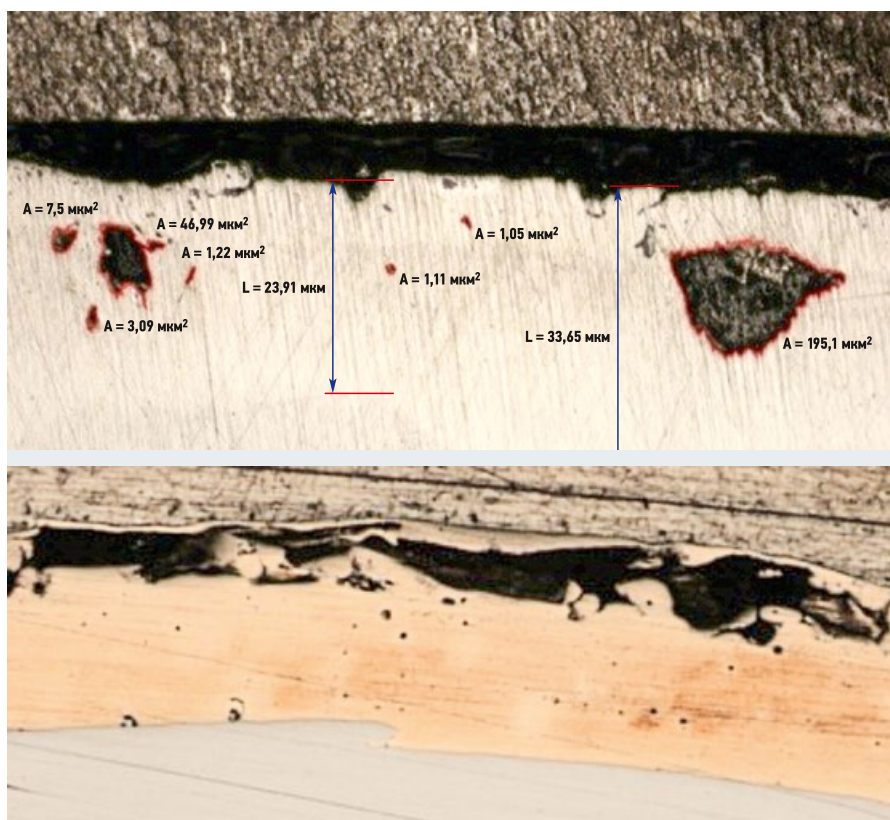


Рис. 2. Типовые коррозионные разрушения двухфазных латуней

Примеры коррозионно-стойких бронз:

1. Бронза СС470К (или бронза RX+) — бронза, предназначенная для литья. Среди литых медных сплавов состав бронзы СС480К отличается сравнительно высоким содержанием олова (Sn) и включением марганца (Mn). Олово используется для улучшения прочности, несущих свойств и коррозионной стойкости по отношению к определённым типам сред. Оно также накладывает некоторые ограничения на конструкцию литых деталей, чтобы избежать проблем с пористостью. Марганец используется для повышения прочности без пропорционального снижения пластичности.

2. Бронза СС499К — бронза, предназначенная для литья. В ней невысокое (4–6 %) содержание олова. Оно используется для улучшения прочности, несущих свойств и коррозионной стойкости по отношению к определённым типам сред. Имеет меньшую твёрдость в сравнении с бронзой RX+ (примерно на 15 единиц по Бриггеллу), предел текучести ниже на 30 %.

3. Кремниевая бронза — сплав, который содержит высокий процент меди и небольшое количество кремния — до 3 %. Является коррозионно-стойким материалом, подходящим для использования в солёной и морской воде.

Введение в состав меди цинка с низким стандартным электродным потенциалом (–0,762 В) приводит к резкому

повышению активности латунных сплавов в окислительно-восстановительных реакциях по сравнению с чистой медью. Однако высокая коррозионная активность цинка сопровождается формированием на поверхности латуни оксидной пассивирующей плёнки, которая останавливает коррозию. Основным обязательным требованием для обеспечения высокой коррозионной стойкости латуни является формирование однородной и сплошной оксидной плёнки по всей поверхности сплава. Выполнение этого требования существенным образом зависит от строения структуры латунного сплава.

Все марки латуней по структурному фактору делятся на две группы [7]: однофазные и двухфазные. При легировании расплава меди цинком в процессе кристаллизации атомы этого элемента занимают узловые точки в формирующейся исходной кристаллической решётке меди. При этом следует учитывать, что возможности кристаллической решётки меди по количеству размещённых атомов цинка имеют ограничения и может растворить до 35–37 % Zn с формированием однофазной α -структуры. При достижении предела растворимости исходной кристаллической решётки в медном сплаве происходит формирование нового типа кристаллической решётки (β -фаза) с повышенной способностью к размещению атомов цинка до 48 %. В результате

в объёме двухфазного ($\alpha + \beta$ фазы) латунного сплава существуют участки с разной концентрацией цинка и, как следствие, с разными значениями стандартного электродного потенциала. Такие участки формируют разницу напряжений (потенциалов), и по электролиту между ними начинает протекать электрический ток, вызывая коррозионные разрушения. Контакт таких участков с водными средами приводит к обесцинкованию, что проявляется в активном переходе цинка в раствор на участке β -фазы с более высокой концентрацией Zn [8]. В результате на этом участке возникает рыхлый слой меди, который из-за низкой прочности разрушается и тоже переходит в раствор. Развитие такого коррозионного процесса приводит к появлению коррозионных язв (пробочное обесцинкование), которые с течением времени могут развиваться в сквозные повреждения (рис. 2).

Большое влияние на развитие коррозии латуней может оказывать состав водной среды. В неподготовленной воде часто содержится ряд примесей, которые по-разному содействуют коррозии этого сплава: фториды оказывают минимальное влияние на коррозию латуни, хлориды — более значительное, а йодиды вызывают сильную коррозию.

В воде, содержащей кислород (O_2), углекислый газ (CO_2), сероводород (H_2S), диоксид серы (SO_2), аммиак (NH_3) и т.д., скорость коррозии латуни резко возрастает. Она легко корродирует в минеральной воде, особенно в воде, содержащей сульфат железа $Fe_2(SO_4)_3$.

Дополнительным фактором, вызывающим разрушение латунных изделий, может являться термическая обработка, выполняемая в виде отжига. При отсутствии термической обработки в литых латунных изделиях могут накапливаться остаточные напряжения, которые при эксплуатации изделий под нагрузкой (внутреннее давление или усиленная затяжка резьбовых соединений) в коррозионно-активных водных средах способствуют развитию коррозионного растрескивания.

Растрескивание латуней может возникнуть при наличии контакта латуни с более электроположительными сплавами (аустенитными сталями, никелевыми сплавами, бронзами), которые способствуют растворению цинка, при наличии резких перепадов температуры или давлений.

Для повышения надёжности систем водоснабжения, отопления и кондиционирования в их составе применяют запорную и регуливающую арматуру из специальной латуни — коррозионно-стойкой (Corrosion-Resistant, CR) или стойкой

к вымыванию цинка (Dezincification Resistant, DZR), получаемой за счёт снижения содержания цинка в латуни, поскольку чем его больше, тем она чувствительнее к коррозионному растрескиванию под напряжением. Конкретное содержание цинка, ниже которого коррозия под напряжением не возникает, зависит от среды. Например, латунь с содержанием цинка менее 20 % обычно не подвергается коррозии под напряжением в естественных условиях, но латунь с низким содержанием цинка может подвергаться коррозионному растрескиванию под напряжением в аммиачной воде. Для предотвращения этого в неё вводят такие элементы, как кремний (Si), мышьяк (As), церий (Ce), магний (Mg). Кремний эффективно предотвращает коррозионное растрескивание под напряжением в однофазных α -латунях. В двухфазных ($\alpha + \beta$) латунях для повышения стойкости к коррозионному растрескиванию легируют Si и Mn, а также Ce и Mg.

Отжиг латуней позволяет полностью снять остаточные напряжения в литом изделии, однако при ускоренном охлаждении отжиг может привести к появлению двухфазной структуры. Так, при концентрации цинка в латуни в интервале 35–39 % полученный медный сплав номинально должен сохранять однофазное строение. Однако при ускоренном охлаждении в таком сплаве может сформироваться двухфазная структура ($\alpha + \beta$), что резко снизит коррозионную стойкость.

Добавление в латунь около 1 % Sn значительно снижает коррозию от обесцинкования и повышает её устойчивость к воздействию водных растворов солей, в частности морской воды. Добавление в латунь около 2 % Pb повышает её износостойкость, тем самым значительно снижая скорость разрушения в проточной

Латунь и бронза имеют ряд преимуществ перед рядом материалов, используемых в системах водоснабжения, отопления и кондиционирования, с точки зрения коррозионной стойкости

воде. Для предотвращения обесцинкования можно добавить небольшое количество мышьяка (As), сурьмы (Sb) или фосфора (P) — в пределах 0,02–0,05 %. Латунь, содержащая 0,5–1,0 % Mn, обладает повышенной прочностью и отличной коррозионной стойкостью.

В европейских стандартах (EN) устойчивые к обесцинкованию DZR-латуни иногда маркируют как коррозионно-стойкие (CR). DZR-латунь чаще всего используют в водяных котлах.

Стойкими к обесцинкованию являются следующие специальные латуни [7]:

- латунь C352 содержит около 30 % цинка, 61–63 % меди, 1,7–2,8 % свинца и 0,02–0,15 % мышьяка, причём свинец и мышьяк значительно замедляют процесс потери цинка;

- «красная латунь» (CW602N) — сплав с высоким содержанием меди и, как правило, с содержанием цинка менее 15 %;

- латунь C464, используемая в морской воде, содержит 40 % цинка и 1 % олова (олово предотвращает вымывание цинка).

Однако некоторые латуни не применяются в системах водоснабжения, отопления и кондиционирования в связи с неподходящим химическим составом или несоответствием механических свойств.

Совместимость разнородных материалов в трубопроводных системах

Для предотвращения коррозии в трубопроводах, проектируемых с применением элементов различного материального ис-

полнения, существует ряд рекомендаций по «дружественному» соседству и совместимости материалов, то есть когда не будет возникать процесс самоуничтожения соединения (табл. 3, 4).

Заключение

Анализируя данные, полученные в результате работы, можно сделать следующие выводы:

1. Латунь и бронза имеют ряд преимуществ перед рядом материалов, используемых в системах водоснабжения, отопления и кондиционирования, с точки зрения коррозионной стойкости.
2. Некоторые сплавы на основе меди имеют ряд недостатков, прежде всего невозможность сочетания с различными видами стали (оцинкованной, нержавеющей и тем более чёрной).
3. Увеличение количества легирующих компонентов в медных сплавах приводит к увеличению стоимости сплава и увеличению хрупкости.
4. Все сплавы на основе меди очень чувствительны к количеству хлоридов, растворённых в рабочей жидкости, перемещающейся по трубопроводу, особенно если говорить о неподготовленной воде. При сравнении латуней DZR и CW617N первая имеет более высокую стойкость по отношению к хлоридам, чем вторая.
5. Сплавы с высоким содержанием меди (например, бронзы RX+) более стойкие к влиянию коррозионных факторов: температуре, скорости потока среды, содержанию хлоридов. ●

Рекомендации по соседству материалов

табл. 3

Материал детали	Рекомендуемый материал	Нерекомендуемый материал
Оцинкованная сталь	Оцинкованная или нержавеющая сталь	Латунь и бронза
Алюминий	Нержавеющая сталь	Оцинкованная сталь, латунь
Латунь	Латунь	Нержавеющая сталь
Бронза	Бронза или нержавеющая сталь	Латунь
Нержавеющая сталь	Нержавеющая сталь или монель	Оцинкованная сталь, латунь

Совместимость материалов по стойкости к гальванической коррозии

табл. 4

Металл / металл	Алюминий	Латунь	Бронза	Медь	Оцинкованная сталь	Железо	Нержавеющая сталь
Алюминий	■	■	■	■	■	■	■
Медь	■	■	■	■	■	■	■
Оцинкованная сталь	■	■	■	■	■	■	■
Нержавеющая сталь	■	■	■	■	■	■	■
Цинк	■	■	■	■	■	■	■

Риски электрохимической коррозии: ■ — низкий риск; ■ — средний риск; ■ — высокий риск.

1. EN 12449:2023. Copper and copper alloys — Seamless, round tubes for general purposes [Медь и медные сплавы. Трубы бесшовные круглые общего назначения] / Дата введ.: 28.06.2023.
2. EN 1982: Compare the properties of all alloy grades/numbers {EN 1982:2008: Сравнение свойств всех марок/номеров сплавов} [Электр. текст]. European Steel and Alloy Grades / Numbers Searchable Database. Режим доступа: steelnumber.com. Дата обращ.: 15.01.2025.
3. DIN SPEC 2701:2018. Unleaded copper alloys — Ingots and castings made of CuSn4Zn2PS [Медные сплавы, не содержащие свинца. Слитки и отливки из сплава CuSn4Zn2PS] / Дата введ.: 01.12.2018.
4. СП 40-108-2004. Проектирование и монтаж внутренних систем водоснабжения и отопления зданий из медных труб // Дата введ.: 11.01.2005.
5. Клинов И.Я. Коррозия химической аппаратуры и коррозионно-стойкие материалы: учеб. пособие. — М.: Машиностроение, 1967. 468 с.
6. Берг П.П., Бидуля П.Н., Гречин В.П. [и др.] Справочник по машиностроительным материалам: В 4 т. / Под ред. Г.И. Погодина-Алексеева. — М.: Машгиз, 1959–1960.
7. Bell T. Learn about the different brass types {О различных типах латуни} [Электр. текст]. ThoughtCo. от 25.06.2024. Режим доступа: thoughtco.com. Дата обращ.: 16.01.2025.
8. Чан Фьюнг Зунг, Тутукина Н.М., Маршаков И.К. Склонность латуней к обесцинкованию в хлоридных средах // Конденсированные среды и межфазные границы, 2009. Т. 11. №4. С. 349–353.

References — see page 80.

[Features of corrosion processes of bronzes and brasses and their influence on the operational characteristics of elements of water supply, heating and air conditioning systems. Pp. 18–22.](#)

Oksana Yu. Elagina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Tribology and Oil and Gas Equipment Repair Technology; **Yuri S. Dubinov**, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metallurgy and Non-Metallic Materials, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Moscow)

-
1. EN 12449:2023. Copper and copper alloys — Seamless, round tubes for general purposes.