

УДК 669.715

## СУДОСТРОИТЕЛЬНЫЕ СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

*А.Н. Кириленко*

*Национальный технический университет Украины  
„Киевский политехнический институт”*

*Приведены области применения, структура и механические свойства судостроительных сплавов на основе алюминия.*

*Наведені галузі застосування, структура і механічні властивості суднобудівних сплавів на основі алюмінію.*

*The fields of application, the structure and mechanical properties of shipbuilding alloys on the basis of aluminium*

### **Введения**

Алюминий – это светлый серебристый металл, имеющий гцк решетку (период 0,404 нм) и не испытывающий аллотропического превращения вплоть до температуры плавления (660°C).

Чистый Al имеет весьма незначительную прочность ( $\sigma_B \approx 45-70$  МПа), однако сплавы на его основе вполне конкурентоспособны – деформируемые сплавы при 20°C имеют значение  $\sigma_B \approx 700$  МПа, литейные  $\sigma_B \approx 550$  МПа.

Рабочие температуры – примерно до 300°C, однако порошковые и композиционные сплавы на основе Al работают до 400-450°C, поэтому номенклатура изделий очень велика и разнообразна.

Алюминий и его сплавы имеют хорошие литейные свойства, высокую технологическую пластичность, хорошую свариваемость и неплохую паяемость. В судостроении распространена сварка деформируемых сплавов на основе алюминия, за исключением Д16, в среде инертных газов. В ряде случаев допускается применение контактной или электронно-лучевой сварки.

К недостаткам алюминиевых сплавов относится повышенная по сравнению со сталью способность деформироваться при сварке. Основная причина деформаций – высокий коэффициент линейного расширения алюминия (примерно в два раза больший, чем стали). Практическим неудобством является то, что при нагреве алюминиевые сплавы не меняют цвета (нет цветов побежалости), вследствие чего легко допустить прожоги во время сварки и при правке конструкций местными нагревами газовой горелкой.

Алюминий и его сплавы имеют высокую коррозионную стойкость, так как на поверхности образуется окисная пленка  $Al_2O_3$  толщиной 100 нм, являющаяся хорошей защитной пленкой. Сплавы на основе Al в морской и пресной воде по коррозионной стойкости превосходят стали, за исключением коррозионно-стойких.

Наиболее важным свойством алюминия, определяющим его широкое применение, является его небольшая плотность ( $\gamma=2,7\text{г/см}^3$ ). По теплопроводности и электропроводности он уступает лишь серебру, золоту и меди. Высокая электропроводимость алюминия ( $\sigma_{273}=38,2\text{ МСм/м}$ ) позволяет применять его как проводниковый материал.

В судостроении технически чистый алюминий марки АД1 применяют при изготовлении переговорных труб, емкостей для хранения пищевых продуктов и воды.

Алюминий марки АОО в виде фольги используется для теплоизоляции судовых помещений.

Основные примеси, присутствующие во всех алюминиевых сплавах, – железо, кремний и марганец, как правило, ухудшают механические и коррозионные свойства.

В качестве основных легирующих элементов во всех алюминиевых сплавах используется всего 5 элементов – 4 металла (Mg, Cu, Zn, Li) и полупроводник Si. Введение их в больших количествах оказывается возможным потому, что они обладают значительной растворимостью в алюминии в твердом состоянии.

Главная функция легирующих элементов – повышение прочности алюминия. Упрочнение достигается за счет образования твердого раствора и, во многих системах, путем дисперсионного твердения. Главным фактором твердорастворного упрочнения является размерный

#### Рл.э. - RAl

##### RAl

Растворимость в твердом состоянии при образовании твердого раствора на основе алюминия для всех элементов ограничена, не растворившиеся частицы образуют в структуре сплава интерметаллические соединения или присутствуют в виде чистых элементов (например, Si, Bi, Cd, Pb, Sn). К избыточным фазам, образованным основными легирующими элементами и алюминием и наиболее часто встречаемым в структуре слитков, относятся интерметаллидные фазы  $Mg_2Si$ ,  $CuAl_2$ ,  $Al_2CuMg$ ,  $Al_2Mg_3Zn_3$ ,  $Al_3Mg_2$  и др.

Магний повышает коррозионную стойкость алюминия, слабо снижает его пластичность и в результате обеспечивает такой комплекс свойств сплавов базовой системы Al–Mg (магналии), благодаря которому

они являются самыми широко используемыми среди алюминиевых сплавов. Магналии маложаропрочные и термически-неупрочняемые сплавы.

Медь существенно снижает коррозионную стойкость алюминия и любых его сплавов. В этом отношении она является вредной добавкой, и ее содержание ограничивают. Но сплавы, легированные медью, упрочняются в результате термической обработки и являются основой жаропрочных сплавов.

Цинк при введении с другими добавками, особенно с магнием и медью, оказывает существенное влияние на свойства сплавов. Термически упрочняемые сплавы систем Al–Zn–Mg и Al–Zn–Mg–Cu (высокопрочные сплавы) обладают самой высокой прочностью среди всех алюминиевых сплавов.

Кремний способен обеспечить хорошую технологичность при литье, что достигается за счет образования в сплавах Al–Si (силумины) значительного количества эвтектической составляющей. В сплавах с другими легирующими элементами тоже можно получить много эвтектики, но при таких больших концентрациях легирующих элементов, когда сплавы уже оказываются хрупкими и малопрочными. Силумины являются наиболее широко распространенными литейными сплавами на алюминиевой основе. Двойные силумины термически не упрочняются. Введение в них магния и меди делает их восприимчивыми к закалке и старению. Поэтому на практике используются в основном многокомпонентные силумины на базе систем Al–Si–Mg и Al–Si–Cu–Mg.

Литий в качестве основного легирующего элемента все чаще начинает использоваться в последние годы, несмотря на дефицитность и слишком высокую химическую активность.

Основные преимущества, которые обеспечивает введение лития, – это заметное повышение модуля упругости и удельной прочности.

Помимо основных легирующих элементов большинство промышленных алюминиевых сплавов содержит малые добавки. Малыми добавками называют легирующие компоненты, содержание которых в промышленных алюминиевых сплавах менее 1 % (десятые – сотые доли %). В качестве таких малых добавок особенно часто используют Mn, Ti, Zr, Cr, V, Ni, Be, Cd, B, Sc и др. Эти добавки вводят в количестве десятых долей процента, а влияние их многостороннее и существенное (соизмеримо с влиянием основных легирующих элементов). Многие из них – хорошие модификаторы зерна (Sc, Ti, Zr) при кристаллизации, особенно вместе с бором. Практически все добавки способствуют измельчению зерна при рекристаллизации.

Добавки в некоторых случаях влияют и на литейные сплавы. Наибольшую жаропрочность литейным сплавам придают добавки Mn, Zr и Sr. Вторичные выделения этих добавок могут обеспечить рост характеристик жаропрочности на 30-50 %.

Алюминиевые сплавы подразделяют на две основные подгруппы: литейные и деформируемые (рис. 1). Область составов деформируемых сплавов простирается от алюминия до сплавов вблизи точки «с» – точки предельной растворимости легирующих элементов в твердом растворе на основе алюминия при эвтектической температуре.

Основной структурной составляющей является  $\alpha$ -твердый раствор на основе Al, объемная доля хрупких интерметаллидов сравнительно невелика, что и обеспечивает высокую деформируемость этих сплавов. Для получения хороших литейных свойств литейные сплавы к концу кристаллизации должны иметь достаточно большое количество эвтектической структурной составляющей. Лучшими литейными свойствами обладают сплавы, лежащие вблизи эвтектической точки «е».

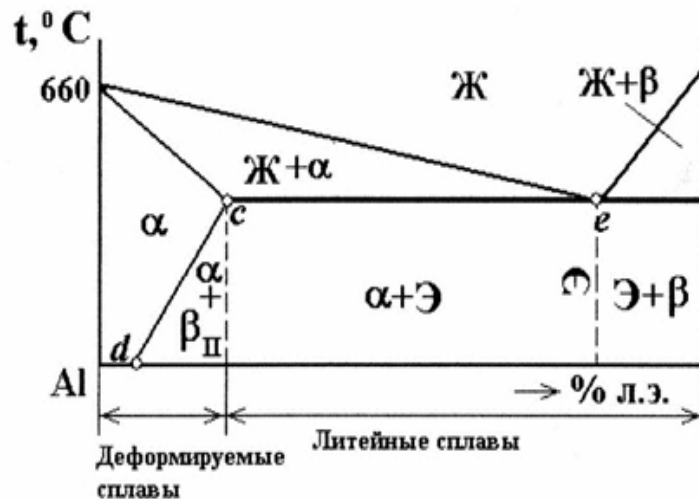


Рис. 1. Диаграмма состояния «алюминий – легирующий элемент»

### Алюминий в судостроении

Легкий, прочный и устойчивый к коррозии алюминий — идеальный металл для судостроения. Именно благодаря этим свойствам стало возможным впоследствии изготовление удобных и прочных алюминиевых лодок, вельботов и картопов для любителей водного отдыха.

Впервые алюминий был использован при постройке парового пассажирского катера в 1891 году. Катер, названный Le Migron, был сконструирован в Швейцарии по заказу Альфреда Нобеля и был рассчитан на 8 пассажиров. Это был первый катер, частично сделанный из алюминия, что подтверждало саму возможность использования

алюминия в судостроении. Можно считать его прообразом популярных сегодня полностью алюминиевых прогулочных катеров “Вельбот” и современных яхт.

Примечательно, что спустя всего три года в 1894 году Шотландская судостроительная верфь Yarrow & Co представила изготовленную из алюминия 58-метровую торпедную лодку. Этот катер с названием «Сокол» был сделан для военно-морского флота Российской империи. Лодка развивала рекордную для того времени скорость в 32 узла.

Годом позже катер из алюминия "Defender" победил в одной из самых престижных в Америке регат (American Cup), окончательно доказав преимущество нового металла. Но в 1895 году стоимость алюминия была в 35 раз выше, чем стоимость стали, что препятствовало активному использованию "легкого металла". Позднее открылся еще один недостаток — коррозия. Как это не удивительно сегодня звучит, оказалось, что сделанные в начале века из алюминия яхты начали подвергаться сильной коррозии в соленой воде. Срок службы всех этих судов оказался на порядок меньше аналогичных судов, сделанных из стали. Несовершенные технологические процессы и непонимание всех свойств и возможностей алюминия мешали широкому распространению этого металла в судостроении. Инженеры оказались перед сложной проблемой, решить которую удалось только спустя десятилетия.

На протяжении долгих лет сталь была самым распространенным и безальтернативным материалом в судостроении, благодаря своей прочности и низкой стоимости. И хотя у стали есть множество преимуществ, главный ее недостаток это вес. Строительство все более грузоподъемных судов делало их громоздкими и плохо управляемыми. Так, за прошедший век с 1910 года максимальный вес судов увеличился более чем в два раза — с 46 тыс. тонн («Titanic») до 109 тыс. тон («Golden Princess»). Фактор веса очень важен в судостроении, так как в конечном итоге он определяет скорость и перевозимую массу полезного груза. И чем быстрее и больше груза перевозят суда, тем быстрее окупаются инвестиции в строительство и больше прибыли получают судовладельцы. Именно это стимулировало к изучению алюминия и его возможностей. Ведь использование "легкого металла" позволяет снизить вес корабля более чем на 50%.

Первые исследования свойств сплавов из алюминия начались в самом начале века, но только к сороковым годам ученые, изучающие проблему коррозии алюминия в морской воде, открыли, что добавление небольшого количества магния и кремния делают алюминий устойчивым к соленой воде. Базовым сплавом судостроителей считается сплав 5083, зарегистрированный Ассоциацией производителей Алюминия

(Aluminium Association) в 1954 г. Хотя этот сплав часто называется судостроительным, он также широко применяется и во многих других отраслях. Сплав 5083 завоевал популярность в судостроении прежде всего благодаря таким своим свойствам, как высокая прочность, коррозионная стойкость, хорошая формуемость и отличные сварочные характеристики.

К шестидесятым годам XX века усовершенствование технологии, а также удешевление алюминия привели к повсеместному использованию «легкого» металла в судостроении - алюминий стали применять при изготовлении корпуса яхт, надстроек, мачт, портовых инфраструктур. В 70-е годы в Скандинавии появились первые скоростные пассажирские суда — катамараны, сделанные из алюминия. Легкие и быстрые, они доказали свою экономическую выгоду и преимущество в скорости и на долгие годы стали стандартом для пассажирских перевозок.

Сегодня сплавы из алюминия, используемые в судостроении, в 100 раз медленнее, чем сталь, поддаются коррозии. На воздухе покрывается тонкой прочной беспористой пленкой  $Al_2O_3$ , защищающей металл от дальнейшего окисления и обуславливающей его высокую коррозионную стойкость.

Поэтому суда из алюминия не требуют такого ухода, как суда из стали, что сказывается на стоимости их содержания. Как правило, все спортивные суда от корпуса до надстроек изготавливаются из алюминия, что дает существенный выигрыш в скорости; а корпуса судов повышенной грузоподъемности изготавливаются из стали, тогда как надстройки и другое вспомогательное оборудование делается из алюминиевых сплавов, снижая общий вес судна и повышая его грузоподъемность.

Наиболее широкое применение среди алюминиевых сплавов для изготовления конструкций речного и морского флота находят магниевые сплавы АМг3, АМг5, АМг6, АМц и Д16 или международные аналоги 5083, 5086, 5454.

До последнего времени сплав 5083, практически не имел конкурентов среди других алюминиевых сплавов. В 1995 г. компанией Rechiney (Франция) зарегистрирован алюминиевый сплав 5383, являющийся улучшенным сплавом 5083. Повысилась коррозионная стойкость металла, на 10% увеличилась ударная вязкость. Эти улучшения потенциально позволяют существенно уменьшить массу сварных судов и включают в себя увеличение на 15 % предела текучести сварных конструкций. Вместе с характеристиками, касающимися характеристик формообразования, загиба, резки и свариваемости, по крайней мере, одинаковых с характеристиками сплава 5083, они делают сплав 5383

очень привлекательным для конструкторов и производителей более крупных и быстроходных судов.

В 1999 г. компания Corus Aluminium Walzprodukte GmbH (Кобленц, Германия) зарегистрировала в Американской алюминиевой ассоциации (American Aluminium Association) сплав 5059 на основе алюминия, названный Alustar. Этот новый сплав доказал что алюминий может быть прочнее стали. Сплав имеет величины временного сопротивления и предела текучести, сравнимые с соответствующими величинами низколегированной стали S235. AlCu<sub>4</sub>SiMg (AA2014). Этот сплав, разработанный также для кораблестроительной промышленности, имеет существенно улучшенные по сравнению с традиционным сплавом 5083 прочностные характеристики.

Исследования продолжаются и возможно, что в скором времени ученые представят нам еще более легкие и прочные алюминиевые сплавы, которые позволят конструкторам создавать суда и конструкции нового поколения.

### **Выводы**

Легкий, прочный и устойчивый к коррозии алюминий — идеальный металл для судостроения. Алюминий и его сплавы имеют высокую коррозионную стойкость, так как на поверхности образуется окисная пленка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 100 нм, являющаяся хорошей защитной пленкой. Сплавы на основе Al в морской и пресной воде по коррозионной стойкости превосходят стали, за исключением коррозионно-стойких. К недостаткам алюминиевых сплавов относится повышенная по сравнению со сталью способность деформироваться при сварке. Основная причина деформаций – высокий коэффициент линейного расширения алюминия (примерно в два раза больший, чем стали). Практическим неудобством является то, что при нагреве алюминиевые сплавы не меняют цвета (нет цветов побежалости), вследствие чего легко допустить прожоги во время сварки и при правке конструкций местными нагревами газовой горелкой. Наиболее широкое применение среди алюминиевых сплавов для изготовления конструкций речного и морского флота находят магниевые сплавы АМгЗ, АМг5, АМг6, АМц и Д16 или международные аналоги 5083, 5086, 5454.

### **Литература**

1. Мутьлина И.Н. Судостроительные материалы: учеб. Пособие.-Владивосток: Изд. ДВГТУ, 2005.-166 с.
2. <http://www.malutka.org>
3. <http://ru-patent.info>
4. <http://www.sudostroi.ru>