

铝合金船舶结构强度

〔苏联〕Г. В. 赫伊佐夫 B. M. 坦贝格夫

L. O. 塔高宾 合著



国防工业出版社

鋁合金船舶結構強度

(設計與計算)

[苏联] Г. Б. 鮑伊佐夫 B. M. 涅貝洛夫

Г. О. 塔烏賓 合著

Г. О. 塔烏賓 總校訂

龍 江 譯



國防工業出版社

1966

內容簡介

本書在運用船舶結構力學公式的基礎上闡述設計鋁合金船體結構的問題，包括鋁合金的性能，上層建築強度計算，採用鋁合金結構的經濟性和設計觀點，以及有關的工藝和焊接知識等。

本書可供設計與科學研究機構中的工程技術人員及大專院校師生參考。

ПРОЧНОСТЬ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
(ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ)

[蘇聯] Г. В. Бойцов, В. М. Небылов, Г. О. Таубин
СУДПРОМГИЗ 1962

鋁合金船舶結構強度

龍江譯

國防工業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可證出字第 074 號

新華書店北京發行所發行 各地新華書店經售

國防工業出版社印刷廠印裝

850×1168^{1/32} 印張 6^{3/8} 162 千字

1966 年 2 月第一版 1966 年 2 月第一次印刷 印數：0,001—0,890 冊

統一書號：15034·1064 定價：(科七) 1.10 元

目 录

序言	3
第一章 船体用铝合金材料	7
§ 1 对适用于船舶建造之铝合金的工艺与结构要求	7
§ 2 铝合金及其焊接接头的物理-机械特性	13
§ 3 铝合金的疲劳强度	16
§ 4 弯曲振动时铝合金的能量耗散特性	23
第二章 铝合金船舶结构设计及强度计算的特点	26
§ 5 总 则	26
§ 6 铝合金船体构件的设计与制造中的某些问题	35
§ 7 铝合金焊接结构的工艺特点	40
§ 8 铝合金结构焊接接头的设计	46
§ 9 关于铝合金船舶结构铆钉连接设计的某些资料	51
第三章 合理设计铝合金船舶结构的重量	
经济性若干问题	55
§ 10 材料机械特性对船舶结构重量的影响	55
由不同材料制成的结构的相当重量概念	55
确定船舶骨架梁的相对重量的原始关系	55
当梁的腹板相对厚度给定时根据强度条件选取尺度的梁的相对重量	57
在梁的腹板厚度给定时根据强度条件选择尺度的梁的相对重量	58
在梁的高度给定时梁的相对重量	60
考虑极限载荷作用下的梁	61
根据刚度条件或稳定性条件选取尺度的梁的相对重量	62
根据强度条件制定尺度的刚性板的相对重量	64
根据板的刚度相等条件或稳定性相等条件选定尺度的板的相对重量	64
梁的跨距及其间距变化对结构构件的相对重量影响的考虑方法	64
用等间距骨材加强的板	65
具有交叉构件的板架	69
确定由不同材料制成的船体的相对重量	72
确定铝合金船体结构相对重量的各项主要结果的综述和应用这些合	
金时对其重量经济性的评价	76
§ 11 材料的机械特性和结构部件的比例对骨架	

梁高度的影响	80
§ 12 有限刚性板	83
§ 13 合理设计船舶受压板架的某些问题	86
骨架制的选择	86
按纵向骨架制构成的同性板架的设计	87
用纵桁加强的板架的稳定性	94
第四章 铝合金上层建筑的强度计算与设计建议	97
§ 14 和主体一致弯曲的、横剖面要素沿长度不变的单层上层 建筑的强度计算	100
问题的提出	100
确定上层建筑与主体连接的刚性系数	104
计算关系式	109
§ 15 横剖面要素沿长度变化的多层上层建筑的强度计算	117
上层建筑的变形微分方程的组列和求解	117
确定上层建筑与主体的刚性参数	125
确定在上层建筑及主体内的应力	130
§ 16 结构复杂的上层建筑的简易算法	133
§ 17 因开口密集分布削弱而使刚度沿长度变化 的长上层建筑的强度计算	138
§ 18 上层建筑的反弯曲计算	147
端部支持在两道主体横舱壁上的上层建筑的反弯曲	147
支持在几道主体横舱壁上的上层建筑的反弯曲计算	154
确定上层建筑弹性基础的刚性系数	161
§ 19 铝合金上层建筑内的温差应力	163
§ 20 关于设计与计算铝合金上层建筑的某些建议	167
选择铝合金上层建筑的铺板厚度及其骨架制	167
具有轻合金上层建筑的主体的极限弯矩及上层建筑骨架 必要的稳定性储备	169
保证镶嵌玻璃的上层建筑板架的强度	170
确定上层建筑各层相互作用的垂向力	176
在铝合金上层建筑结构的横剖面面积急剧变化区域内的构件外形	179
§ 21 例题	180
第五章 铝合金结构的强度标准	198
参考文献	203

鋁合金船舶結構強度

(設計與計算)

[蘇聯] Г. Б. 鮑伊佐夫 B. М. 涅貝洛夫

Г. О. 塔烏賓 合著

Г. О. 塔烏賓 總校訂

龍 江 譯



國防工業出版社

1966

內容簡介

本書在運用船舶結構力學公式的基礎上闡述設計鋁合金船體結構的問題，包括鋁合金的性能，上層建築強度計算，採用鋁合金結構的經濟性和設計觀點，以及有關的工藝和焊接知識等。

本書可供設計與科學研究機構中的工程技術人員及大專院校師生參考。

ПРОЧНОСТЬ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
(ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ)

[苏联] Г. В. Бойцов, В. М. Небылов, Г. О. Таубин
СУДПРОМГИЗ 1962

鋁合金船舶結構強度

龍江譯

國防工業出版社出版

北京市書刊出版業營業許可證出字第 074 號

新華書店北京發行所發行 各地新華書店經售

國防工業出版社印刷廠印裝

850×1168^{1/32} 印張 6^{3/8} 162 千字

1966 年 2 月第一版 1966 年 2 月第一次印刷 印數：0,001—0,890 冊

統一書號：15034·1064 定價：(科七) 1.10 元

序 言

船舶制造界之所以很注意鋁合金是有許多原因的，其中包括采用鋁合金可以減輕結構的重量。

在船舶制造中应用鋁合金的試驗阶段早已过去了，而且已得到一定的推广，可是还不够普遍。現在最常見到的是用鋁合金作为上甲板以上的結構，例如上层建筑与甲板室。但是也已經有个别的利用这种合金作为船舶主体的主要材料得到成功的例子。

这种例子之所以較少，看来在很大的程度上是因为用焊接鋁合金制造船体結構时，由于这些合金的强度特性較低，而低估了結構重量減輕的可能性。此外，也說明还有人顾虑这种結構在船舶营运的实际情况下不充分可靠。

鋁合金的优点是显著的，例如鋁合金和鋼相比，其比重要小得多，而且具有較高的耐蚀性能，故可认为不仅是对上层建筑和甲板室，而且也对各种不同类型和用途的船舶主体，都可广泛地运用鋁合金作为材料。

同时，金屬船体的重量降低，一般能使船舶的排水量减小，或者（在保持排水量不变时）增大其載貨量和速度，以及改善稳性。

在保持原有稳性的条件下，有可能减小船寬或船体的方型系数，这样就可以降低船舶在运动时的水阻力，从而减小主机的功率，或者增加船舶的航速。

对油船及其他运載液体貨物的船舶主体，用鋁合金作为材料是有很大前途的。通常，用鋁合金来代替鋼材可減輕船体重量，从而使油船貨艙容积內的貨載增加，这样就能达到提高这类船舶的載貨量的目的。

关于在船舶制造中应用铝合金的问题，近来已发表了許多著作。从 1958 年开始，这个涉及多方面的問題已成为单独的专门课题。大多数論文都論及制造工艺和各个部件与分段的焊接工艺。在有些論文中列举了計算铝合金結構强度的简单方案。但这些論文的作者并未給自己規定分析强度問題的任务，而是从說明采用铝合金来代替鋼材可大大減輕結構重量的企图出发的。

本书作者贊成广泛地采用铝合金作为船体材料，但是也明确地了解，在通向解决此問題的道路上，尙未克服所有的困难。

虽然铝合金的焊接是成功了，但是焊接接头的强度仍低于基本金屬的强度；对在不定載荷与交变載荷条件下的材料的变形性能尙未作研究。对于在空間应力状态中及在冲击載荷等等作用下的铝合金結構，其性状亦未完全了解，需进一步研究。

目 录

序言	3
第一章 船体用铝合金材料	7
§ 1 对适用于船舶建造之铝合金的工艺与结构要求	7
§ 2 铝合金及其焊接接头的物理-机械特性	13
§ 3 铝合金的疲劳强度	16
§ 4 弯曲振动时铝合金的能量耗散特性	23
第二章 铝合金船舶结构设计及强度计算的特点	26
§ 5 总 则	26
§ 6 铝合金船体构件的设计与制造中的某些问题	35
§ 7 铝合金焊接结构的工艺特点	40
§ 8 铝合金结构焊接接头的设计	46
§ 9 关于铝合金船舶结构铆钉连接设计的某些资料	51
第三章 合理设计铝合金船舶结构的重量	
经济性若干问题	55
§ 10 材料机械特性对船舶结构重量的影响	55
由不同材料制成的结构的相当重量概念	55
确定船舶骨架梁的相对重量的原始关系	55
当梁的腹板相对厚度给定时根据强度条件选取尺度的梁的相对重量	57
在梁的腹板厚度给定时根据强度条件选择尺度的梁的相对重量	58
在梁的高度给定时梁的相对重量	60
考虑极限载荷作用下的梁	61
根据刚度条件或稳定性条件选取尺度的梁的相对重量	62
根据强度条件制定尺度的刚性板的相对重量	64
根据板的刚度相等条件或稳定性相等条件选定尺度的板的相对重量	64
梁的跨距及其间距变化对结构构件的相对重量影响的考虑方法	64
用等间距骨材加强的板	65
具有交叉构件的板架	69
确定由不同材料制成的船体的相对重量	72
确定铝合金船体结构相对重量的各项主要结果的综述和应用这些合	
金时对其重量经济性的评价	76
§ 11 材料的机械特性和结构部件的比例对骨架	

梁高度的影响	80
§ 12 有限刚性板	83
§ 13 合理设计船舶受压板架的某些问题	86
骨架制的选择	86
按纵向骨架制构成的同性板架的设计	87
用纵桁加强的板架的稳定性	94
第四章 铝合金上层建筑的强度计算与设计建议	97
§ 14 和主体一致弯曲的、横剖面要素沿长度不变的单层上层 建筑的强度计算	100
问题的提出	100
确定上层建筑与主体连接的刚性系数	104
计算关系式	109
§ 15 横剖面要素沿长度变化的多层上层建筑的强度计算	117
上层建筑的变形微分方程的组列和求解	117
确定上层建筑与主体的刚性参数	125
确定在上层建筑及主体内的应力	130
§ 16 结构复杂的上层建筑的简易算法	133
§ 17 因开口密集分布削弱而使刚度沿长度变化 的长上层建筑的强度计算	138
§ 18 上层建筑的反弯曲计算	147
端部支持在两道主体横舱壁上的上层建筑的反弯曲	147
支持在几道主体横舱壁上的上层建筑的反弯曲计算	154
确定上层建筑弹性基础的刚性系数	161
§ 19 铝合金上层建筑内的温差应力	163
§ 20 关于设计与计算铝合金上层建筑的某些建议	167
选择铝合金上层建筑的铺板厚度及其骨架制	167
具有轻合金上层建筑的主体的极限弯矩及上层建筑骨架 必要的稳定性储备	169
保证镶嵌玻璃的上层建筑板架的强度	170
确定上层建筑各层相互作用的垂向力	176
在铝合金上层建筑结构的横剖面面积急剧变化区域内的构件外形	179
§ 21 例题	180
第五章 铝合金结构的强度标准	198
参考文献	203

第一章 船体用鋁合金材料

§ 1 对适用于船舶建造之鋁合金的工艺与結構要求

在地壳中鋁的儲藏量要比鉄多一半，然而由于从天然化合物中分离純鋁的复杂性，因此它的合金要較鋼貴好几倍。在另一方面，随着动力工业的发展，又形成了不断降低鋁合金价格的先决条件。

純鋁具有很低的强度指标，不能用作承受载荷的构件。为了提高强度指标，应采用鎂、硅、銅、鋅等元素使純鋁合金化。現代冶炼工业生产的带有这些附加剂的鋁合金，較鋼具有更大的比强（所謂比强，可理解为表征材料屈服限与其比重比值的系数）。

在船舶制造中优先采用的是热处理不能强化的形变鋁鎂合金〔2〕。它們具有較高的塑性，較低的或中等的强度，足够高的耐蝕性及良好的可焊性。目前尚无热处理能强化的鋁合金用于船舶船体結構上，因为它们們在焊縫的回火区域中要軟化，而且也因为它们們的塑性較低。这些合金可以广泛地用于铆接結構，但在船舶制造中这种铆接結構仅能用于极有限的範圍內。

热处理不能强化的合金，能通过冷加工，即在冷却状态中的冷作硬化而提高其强度特性。这种提高强度的效应在軋制型材时也会出现（压延效应）。

由于鋁合金的塑性和便于軋压，使用它們制作的型材有可能比鋼材品种更多且剖面更为复杂。

杜拉鋁[●]、B-95及其他硬鋁合金在海水中的耐蝕性較低，所

● 原文为 Дюралюминий тип，又称硬鋁，是一种鋁-銅-鎂合金系，本书以后提及的 Д16-АТ及 Д16-АМ皆屬此类，是一种热处理能强化的形变鋁合金，在苏联生产的这类合金，多包覆有純鋁以抵抗腐蝕，英美生产的硬鋁薄板有不带包覆金屬，而靠氧化层和髹漆来抗蝕者。——譯者

以它們不宜用作船体結構材料，甚至对于鉚接情况亦不大适用。这些合金中含有銅的成分，它在海水中形成阴极，并与鋁組成电解除回路。在这种情况下就发生强烈的腐蝕現象。

船体結構設計不应当与制造它的工艺过程設計分开进行。任何結構均應該是坚固的、可靠的、經久的及制造工艺性良好的。工艺性是與結構不可分离的质量，它在很大的程度上取决于所采用的設計方案、方法与构件之間的连接性质，最好能在强度相等的条件下求得制造結構的最简单和最經濟的工艺方法。当然，鋁合金的工艺特性及物理-机械特性将显著地改变用其他造船材料已經建立起来的船舶結構設計与制造方法。

在船舶制造的实践中，对能够用作船体結構材料的鋁合金，已拟定出一般的要求。

这些要求的基本原則归納如下：

1. 制造船体的鋁合金性质必須滿足：在建造工厂的生产条件下，可以用它們制造各种船体构件，并能保証这些构件在船舶营运时工作可靠。

2. 鋁合金的品种，应能在数量上保証滿足整个船体結構生产过程中供应的可能性，要保証所需要的板材的型号，也要保証型材的型号。

对每一种合金必須确定該牌号組成元素的上下限。

3. 制造船体結構时应尽量采用可焊的鋁合金。这些合金除滿足所有焊接工艺的要求外，还必须保証焊接接头的强度不低于基本金屬强度的90%。

4. 应保証各种厚度的板，在龍門剪床上切割、折边、制造箱形龙骨及冷压零件时，均不产生裂縫。

5. 当球緣型材的球緣向內或向外冷弯成骨材时，不应出現裂縫。球緣型材应能經得住在 $r = 5h$ 时的弯曲，其中 r ——弯曲半徑； h ——型材高度。

6. 当檢驗鋁合金对机械时效的傾向时，冷作后材料的塑性

与韧性不应有大的变化。为此，可在温度不低于 $+100^{\circ}\text{C}$ 的情况下，作100小时冷弯变形材料的加速时效试验。

在技术时效之后，金属需经受静力及动力试验。这些试验是对经过冷弯的典型船舶零件按特殊方法进行的。

同时，还需要用拉断与冲击试验来检验材料的机械性能。

7. 铝合金及其焊接接头耐总的、局部的、点的及晶粒间的腐蚀的性能，应不低于未作工艺包覆及未刷任何保护性涂层的AMr-5B合金的耐蚀性。

应在海水中对焊接与铆接接缝，以及在试验室条件下检验铝合金试件耐上述各种腐蚀的性能。同时应特别注意检验因金属的伤痕及其他表面缺陷对加速腐蚀的影响。

8. 铝合金冷作后引起的冷却状态下的变形，不应具有增加晶粒间腐蚀的倾向。

对于板，应在塑性变形5%以后进行检验，且随后应在温度接近 $+100^{\circ}\text{C}$ 时，作100小时的人工时效试验。

9. 船体承受着各种交变载荷的作用。所以船体用铝合金无论在容易产生应力集中或不容易产生应力集中的地方，疲劳强度总是重要的特性。

持久（疲劳）极限是对光滑的与有切口的基本金属试件，以及具有焊缝的板，通过纯弯曲试验来确定的。在积累到适当的资料以前，所得到的疲劳极限值是供临时参考的。

10. 铝合金比钢材的熔点低 $\frac{2}{3}$ 以上（ $\sim 650^{\circ}\text{C}$ ）。这种情况具有很大的意义，因为船体结构不仅在机械力作用下，而且在高温作用下也能引起破坏。

当加热到 $+100^{\circ}\text{C}$ ，船舶制造中应用的铝合金应保持它的机械性能（强度与塑性）没有变化。加热到 $+250^{\circ}\text{C}$ 时， σ_r 值的减小应不大于40%。

11. 铝合金的板与型材，应在船体车间采用一般的工艺条件下能够用以制成船舶结构。

上述各原則的重要性是不相同的。但能使其完整則更好，因為為了在船舶製造中更廣泛地採用鋁合金，重要的是需要它們具有必要的物理-機械特性，滿足工藝的基本要求。

為了使鋁合金能用作船體材料，除強度、塑性及其他物理-機械性能指標外，還應該具有耐蝕性。

當鋁合金在侵蝕性環境中試驗時，可能得到一些相互矛盾的結果。但分析表明，如預先採取特別措施（氧化及塗漆等），則鋁合金構件的腐蝕過程比鋼結構要緩慢得多。

預防腐蝕的措施，對船舶水下部分的表面是很必要的，該處的保护層可能經常遭到損壞，且維修周期很長。

關於金屬的腐蝕-機械強度問題，近來蘇聯中央海運科學研究所作了相當廣泛的研究。他們特別注意於研究在空氣與侵蝕介質中的鋼質與鋁合金試件之應力集中與疲勞強度的關係。

在此研究所的報告〔6〕中，列舉了幾種牌號的船體結構鋼（Ст.4С、СХЛ-1、СХЛ-4及МК等）與АМг-5В和АМг-6型鋁合金的試驗資料。

該報告表明，有切口的鋼試件在腐蝕環境（在3%的NaCl溶液中，承載到 $10\sim 20 \times 10^6$ 循環為止）中，其疲勞強度的持久極限比在空氣中為高。

在侵蝕介質中的這種有利影響（將切口底部的尖角加以鈍化），沒有在鋁試件疲勞極限的試驗中發現。但是，如採取預防腐蝕的措施，則在海水中的疲勞強度不應成為妨礙採用鋁合金作為水綫以下船體外板材料的原因。

很顯然，當採用鋁合金時，應該儘可能採用各種措施來保護船體構件不受腐蝕。

在這種條件下，應更多地關心船體上部的腐蝕，特別是對那些具有各種開口及其他應力集中策源地的構件（甲板板、上層建築與平台的圍壁與鋪板）。

在文獻中有一些具有甚至沒有防腐塗料的鋁合金上層建築的

船舶經過長期使用的例子。但在這些情況下，應特別注意預防鋁合金與鋼結構接觸處的腐蝕，並將上層建築設計成適當的結構形式。

這些資料與鋼船建造的經驗表明，採用正確的工藝與設計方案可使腐蝕對疲勞強度的影響降低到最小。

由於鋁合金的熔點低，許多專家反對採用鋁合金作船體材料。反對的意見是，由於鋁的熔點較低，同時在比鋼低得多的溫度條件下就要喪失其強度性能，所以其耐火性是不足的。

然而，現在許多研究表明，鋁合金卻具有這種有決定意義的特性：例如直至加熱到 200°C 為止，屈服限很少降低；直到 $+150^{\circ}\text{C}$ 為止，板的強度極限實際上是不變的；在此情況下，伸長率與壓縮率甚至还提高了一些。

因此，為了使受外載荷的結構在營運條件下不超過上述溫度，應在採用鋁合金建造船體時，對此採取措施。

如果不能避免構件受熱，則在此情況下，應預先規定相應的結構絕熱措施。在旅客住艙的周圍，很多船舶應用例如馬利尼特[●]這樣的絕緣材料，它同樣具有防火特性。應當指出，英國運輸部門曾為滿足國際公約的所有要求，對鋁合金結構的防護方法擬定了研究提綱。按照這些要求，艙室內的溫度可能上升到 927°C ，用鋁合金建造的圍壁結構應能在此溫度的作用下支持一小時而不損壞。在此情況下，未經防護的結構是可能熔化的。

為了防止受熱結構高於危險溫度，提出了一系列消防措施，其中有：

在所有可能發生火災的房間里裝置自動灑水器與自動報警系統；

艙室內部絕熱；

● 原文為 Маринит, 這是英文 Marinite 的譯音, Marinite plate 是一種防火板, 由無機的、能抵抗火焰的石棉等材料製成, 有各種厚度, 比較輕巧, 且有一定的強度。——譯者

将船舶分成若干艙室，其中应该采用絕热与自动报警系統。

在参考文献[34]中列举了有关具有内部絕热覆盖物的鋁合金艙室消防試驗的資料。所采用的絕緣构件証明足以防止損坏，而且除了一些火焰直接接触到金屬的地方以外，連艙室外面甚至也沒有产生显著的变形。因此，試驗結果指出，对于客船上的鋁质上层建筑应用絕緣是有成效的。英国用鋁协会研究了几种比重小而有足够耐火性的絕热的艙室圍壁和隔壁。其中，絕緣可以用液体石棉层、带有噴霧器或石棉的馬利尼特板。

文献[35]中指出，在火焰的作用下，鋁仅局部熔化而不会燃燒。鋁合金的导热性比鋼大得多，由于它能傳走大量的热量，故可以减小由火灾引起的損坏区域。

为了研究用鋁合金制造的結構的性质，曾在失火的条件下进行了一系列实验。研究表明，当增加鋁合金結構的横剖面面积（与用鋼制作的同一結構的横剖面面积相比）时，由于从加热区傳走的热量增多，其强度損失比鋼結構为小。

还要指出，为了提高与航行安全有关的耐火性，应在鋁合金零件上包盖一层液态石棉。在各种不同来源的文献中差不多都提到这样的建議：絕緣层的厚度为 16 至 20 毫米。

普遍认为[37]，虽然因为鋁合金具有較低的耐火性而存在一些缺点，但还是不能认为它不宜于作客船船体的材料。

用来将艙間分隔成許多艙室的甲板、艙壁及圍壁，可阻止火焰在水平方向与垂直方向漫延。

鋁合金的技术优越性是如此明显，决不能限制它在船舶制造工业中应用[38]。

根据外国杂志上所引用的資料，鋁合金的防火性不足，显然不能阻碍它用作船体材料。

必須补充說明，船舶制造中采用的鋁合金，不仅不会燃燒，而且与鋼材相反，在撞击情况下也不会产生火花。