

УДК 669.018.44:669.715:669.018.26

Н.И. Колобнев¹

ЖАРОПРОЧНОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-32-36

Представлен обзор некоторых вопросов, касающихся теории жаропрочности алюминиевых сплавов, а также основных факторов, влияющих на жаропрочность, к которым относятся физико-химические и структурные характеристики сплавов. Приведены результаты исследований химического и фазового составов, зеренной структуры и механических свойств основных сплавов, используемых для работы при повышенных температурах, и влияния на их жаропрочность режимов термической обработки. Дана сравнительная оценка уровня пределов длительной прочности и ползучести сплавов систем Al–Cu–Mg (Д19, АК4-1, ВД17, В-1213), Al–Cu–Mn (Д20, 1201) и Al–Cu–Li (1230, В-1461), дополнительно легированных переходными металлами и редкоземельными элементами. В температурном интервале 150–200°C при продолжительности воздействия 100–1000 ч сплавы можно расположить в следующем порядке с учетом повышения уровня жаропрочности: Д19, АК4-1, ВД17, Д20, В-1213. Алюминий-литиевый сплав В-1461 имеет преимущество по характеристикам жаропрочности до температуры 175°C при продолжительности воздействия 100–1000 ч благодаря более высоким прочностным свойствам при комнатной температуре.

Ключевые слова: жаропрочность, алюминиевые деформируемые сплавы, ползучесть, диффузия, зеренная структура, кристаллическая решетка.

The paper is presenting a review of certain matters relating to the theory of heat resistant aluminum alloys as well as the major factors affecting the heat resistance including physical, chemical and structural properties of the alloys. Results of investigations of chemical and phase composition, grain structure and mechanical properties of alloys most widely used for operation at elevated temperatures are given; an influence of heat treatment conditions on heat resistance is described as well. A comparative estimation of ultimate values of rupture strength and creep characteristics is given for Al–Cu–Mg (D19, AK4-1, VD17, B-1213), Al–Cu–Mn (D20, 1201) and Al–Cu–Li (1230, V-1461) alloys additionally alloyed with transition metals and rare-earth elements. In the temperature range 150–200°C at 100–1000 hours exposure the alloys can be arranged in the following order based on increasing levels of heat resistance: D19, AK4-1, VD17, D20, V-1213. The Al–Li alloy B-1461 has the advantage of heat resistance up to a temperature of 175°C at 100–1000 hours exposure due to higher strength properties at room temperature.

Keywords: heat resistance, wrought aluminum alloys, creep, diffusion, grain structure, crystal lattice.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Для создания и развития перспективной авиационной и космической техники требуется разработка жаропрочных сплавов, в том числе алюминиевых, работоспособных (длительно) при повышенной температуре [1–7]. Обоснованием теоретических положений жаропрочности металлических сплавов занимались многие отечественные и зарубежные исследователи, среди которых значительный вклад в исследование этой темы внес А.А. Бочвар [2, 8–10]. Дальнейшее развитие разработанных им направлений и практическое применение их в производстве алюминиевых жаропрочных сплавов было осуществлено сотрудниками ВИАМ: О.А. Романовой, Е.И. Шиловой, И.Н. Фридляндером и др. [11, 12].

Результаты

Под жаропрочностью сплава обычно понимается степень его сопротивления длительному сум-

марному воздействию повышенных температур и напряжений. Большое влияние на жаропрочность сплавов оказывают физико-химические и структурные факторы [2, 8–10]. К физико-химическим факторам относится энергетическое состояние кристаллической решетки твердого раствора, включая дефекты кристаллической решетки, силы межатомной связи и электронную концентрацию [13–16]. Важнейшими структурными факторами являются: величина зерен твердого раствора, протяженность и состояние границ зерен; количество, размер и форма частиц вторичных фаз; устойчивость твердого раствора, рост и коагуляция частиц продуктов его распада. Следует учитывать и влияние на жаропрочность некоторых технологических факторов: термомеханические параметры изготовления полуфабрикатов и режимы упрочняющей термической обработки.

Алюминиевые деформируемые сплавы, работоспособные при повышенных температурах, раз-

рабатывались с учетом вышеуказанных факторов, при этом особое внимание уделялось уменьшению диффузионной подвижности атомов легирующих элементов (л.э), особенно атомов основы сплава (самодиффузия). Для оценки жаропрочности алюминиевых сплавов определяют пределы длительной прочности и ползучести в температурно-временных интервалах, учитывающих условия работы элементов конструкции.

Наибольшим сопротивлением пластическому деформированию при длительном воздействии высокой температуры и нагрузки обладают твердые растворы с максимальной прочностью межатомной связи и минимальным искажением кристаллической решетки.

Особенно повышает жаропрочность сплавов легирование переходными металлами, которые способствуют увеличению сил межатомной связи с алюминием, уменьшению самодиффузии атомов алюминия в кристаллической решетке твердого раствора, устойчивости зон Гинье–Престона (ЗГП) и метастабильных фаз, а также росту и коагуляции стабильных фаз. Все это задерживает движение дислокаций, что повышает жаропрочность сплавов.

Для оценки силы межатомной связи можно использовать величину температуры плавления, энергии сублимации, температурного коэффициента линейного расширения и др. [2, 8, 14]. Наибольшая сила межатомной связи у переходных металлов Mo, Zr, Ni, Cr, Mn и других (табл. 1).

Межатомная связь в кристаллической решетке твердых растворов зависит от электронного вклада, вносимого атомами легирующих элементов [15, 16]. Чем выше планируется температура, при которой длительное время будет эксплуатироваться сплав, тем сильнее должна быть межатомная связь между основой сплава и легирующими элементами, имеющими низкий коэффициент диффузии в твердом алюминии.

Легирующие элементы, которые приводят к сильному искажению кристаллической решетки твердого раствора, не способствуют повышению жаропрочности алюминиевых сплавов, по сравнению с добавками, значительно усиливающими

прочность межатомной связи без существенного искажения кристаллической решетки. Вакансии так же, как и легирующие элементы, искажают кристаллическую решетку.

При замещении атома алюминия в узлах кристаллической решетки [2] легирующий атом вызывает локальное растяжение ($r_{л.э} > r_{Al}$, где r – атомный радиус) или сжатие ($r_{л.э} < r_{Al}$) прилегающих участков решетки (табл. 2).

Увеличение степени искажения кристаллической решетки и повышение плотности дефектов (вакансий, дислокаций и др.) приводит к росту прочностных характеристик сплава при комнатной температуре. Однако при высоких температурах решетка, имеющая запас свободной энергии, термодинамически неустойчива. В ней увеличивается диффузионная подвижность атомов, происходят распад твердого раствора и разупрочнение сплава со снижением его характеристик жаропрочности.

Среди структурных факторов особо следует выделить влияние на жаропрочность алюминиевых сплавов размера зерна и связанную с ним протяженность границ зерен твердого раствора [17]. Границы зерен обладают высокой поверхностной энергией и находятся в термодинамически неустойчивом состоянии. Следовательно, чем больше размер зерен, тем меньше их протяженность, ниже запас свободной энергии и слабее развиты диффузионные процессы.

Следует также отметить большое влияние на жаропрочность алюминиевых сплавов ряда технологических факторов (термомеханические параметры изготовления полуфабрикатов, режимы термической обработки и др.), которые могут сильно изменять как зеренную структуру в процессе рекристаллизации и фазовый состав, так и величину и характер расположения структурных составляющих. Изменяя те или иные технологические параметры, можно воздействовать на структурные и физико-химические характеристики сплава, что в определенных пределах обуславливает изменение его жаропрочности [2, 8].

На жаропрочность алюминиевых сплавов оказывают сильное влияние количество, размеры и

Таблица 1

Температура плавления, характеризующая силу межатомной связи в кристаллической решетке некоторых металлов

Металлы	Zn	Mg	Al	Cu	Mn	Cr	Fe	Ti	Zr	Mo
Температура плавления, °C	419	650	660	1083	1245	1890	1535	1820	1750	2625

Таблица 2

Атомный радиус элементов

Элементы	Al	Mg	Zn	Cu	Ti	Zr	Cr	Fe	Ni	Cd	Si
Атомный радиус, нм	0,143	0,16	0,137	0,127	0,146	0,16	0,128	0,127	0,124	0,152	0,13

Таблица 3

Химический и фазовый составы алюминиевых деформируемых сплавов

Система легирования	Сплав	Содержание элементов, % (по массе)				Фазовый состав
		Cu	Mg	Mn	Li	
Al-Cu-Mg-Mn	Д19	4,0	2,0	0,75	–	Al ₂ CuMg; Al ₁₂ Mn ₂ Cu
	АК4-1	2,3	1,5	–	–	Al ₂ CuMg; Al ₉ NiFe; Mg ₂ Si
	ВД17	3,0	2,2	0,6	–	Al ₂ CuMg; Al ₁₀ Mg ₂ Mn; Al ₁₅ Si ₂ (MnFeCu) ₃
	В-1213	5,2	0,5	0,3	–	Al ₂ Cu; Al ₁₀ Mg ₂ Mn; Al ₃ Zr
Al-Cu-Mn	Д20	6,5	0,3	0,6	–	Al ₂ Cu; Al ₁₂ Mn ₂ Cu; Al ₁₀ Mg ₂ Mn
	1201	6,0	–	0,6	–	Al ₂ Cu; Al ₁₂ Mn ₂ Cu
Al-Cu-Li	1230	5,3	–	0,6	1,2	Al ₂ CuLi; Al ₃ Li; Al ₁₂ Mn ₂ Cu
	В-1461	2,8	0,3	0,2	1,7	Al ₂ CuLi; Al ₃ Li; Al ₃ (ZrSc)

Таблица 4

Механические свойства жаропрочных алюминиевых сплавов при комнатной температуре

Сплав	d , кг/м ³	E , ГПа	Полуфабрикат	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %
				МПа		
Д19-Т	2760	67	Листы	417	265	10
			Прессованные профили	412	294	10
АК4-1-Т1	2760	70,6	Листы	387	314	6
			Прессованные профили	392	323	6
ВД17-Т1	2750	70	Прессованные профили	440	280	10
Д20-Т1	2840	70	Листы	372	274	8
			Прессованные профили	353	235	8
1201-Т1	2850	69,6	Листы	402	314	6
			Прессованные профили	392	294	6
В-1461-Т1	2630	79	Листы	500	450	7
			Прессованные профили	560	510	7

Таблица 5

Механические свойства листов из жаропрочных алюминиевых сплавов

Сплав	Предел прочности	Значение предела прочности, МПа, при температуре, °C						
		20	100	150	175	200	250	300
Д19-Т	σ_B	440	420	400	375	360	290	190
	$\sigma_{0,2}$	300	280	270	260	250	240	160
АК4-1-Т1	σ_B	395	–	370	330	310	240	–
	$\sigma_{0,2}$	350	–	330	300	260	190	–
ВД17-Т1	σ_B	490	441	422	–	372	235	166
	$\sigma_{0,2}$	323	284	270	–	265	166	108
Д20-Т1	σ_B	392	353	314	–	255	176	117
	$\sigma_{0,2}$	294	265	245	–	176	117	98
1201-Т1	σ_B	420	–	340	–	290	220	–
	$\sigma_{0,2}$	330	–	275	–	220	170	–
В-1461-Т1	σ_B	515	–	445	425	–	–	–
	$\sigma_{0,2}$	475	–	430	425	–	–	–

Таблица 6

Пределы длительной прочности и ползучести листов из жаропрочных алюминиевых сплавов

Сплав	σ_{100}^{150}	σ_{100}^{175}	σ_{1000}^{175}	σ_{100}^{200}	$\sigma_{0,2/100}^{150}$	$\sigma_{0,2/100}^{175}$	$\sigma_{0,2/100}^{200}$	$\sigma_{0,2/1000}^{175}$
	МПа							
Д19	260	225	167	176	170	135	78	—
АК4-1	290	—	—	—	230	—	—	—
ВД17	265	215	186	—	225	186	—	120
В-1213	350	—	—	—	330	—	—	—
В-1461	330	260	240	—	—	—	—	—

характер распределения вторичных фаз. По мнению ученого А.А. Бочвара, жаропрочность при температурах выше $0,6T_S$ достигается в основном благодаря получению гетерогенной структуры [18]. На повышение жаропрочности алюминиевых сплавов также влияют дисперсные металлические соединения, в состав которых входят и переходные металлы: Al_6Mn , Al_7Cr , Al_9FeNi , $Al_{12}Mn_2Cu$, Al_6Cu_3Ni и другие. Эти соединения устойчивы при повышенных температурах, слабо взаимодействуют с твердыми растворами, их частицы не склонны к укрупнению и коагуляции, а также препятствуют передвижению дислокаций. Дислокации внутри зерен твердого раствора вынуждены обходить их или перемещаться путем переползания. В обоих случаях дислокации перемещаются под воздействием значительно больших напряжений, чем при скольжении. Присутствие твердых термически стабильных избыточных фаз сложного состава повышает жаропрочность твердого раствора.

Алюминиевые деформируемые сплавы, предназначенные для работы при высоких температурах, разработаны преимущественно на базе системы $Al-Cu$ и дополнительно легированы переходными металлами и редкоземельными элементами (табл. 3).

Сплавы систем $Al-Cu-Mg-Mn$ и $Al-Cu-Mn$ относятся к среднепрочным (табл. 3). Сплавы системы $Al-Cu-Li$ обладают высокой прочностью, повышенным модулем упругости и пониженной плотностью (табл. 3–6) [11, 12, 19–22].

Обсуждение и заключения

Основными факторами, влияющими на жаропрочность алюминиевых деформируемых сплавов, являются:

- энергетическое состояние кристаллической решетки твердого раствора, включая дефекты кристаллической решетки, силы межатомной связи и электронную концентрацию;
- величина зерен твердого раствора, протяженность и состояние границ зерен; количество, размер и форма частиц вторичных фаз;
- устойчивость твердого раствора и вторичных фаз.

Сравнительная оценка уровня пределов длительной прочности и ползучести сплавов систем $Al-Cu-Mg$ (Д19, АК4-1, ВД17, В-1213), $Al-Cu-Mn$ (Д20, 1201) и $Al-Cu-Li$ (1230, В-1461), дополнительно легированных переходными металлами и редкоземельными элементами, показала, что в температурном интервале $150-200^\circ C$ и при продолжительности воздействия $100-1000$ ч сплавы можно расположить в следующем порядке повышения уровня жаропрочности: Д19, АК4-1, ВД17, Д20, В-1213. Алюминий-литиевый сплав В-1461 превосходит по жаропрочным характеристикам (до температуры $175^\circ C$ в течение $100-1000$ ч) другие алюминиевые сплавы благодаря тому, что обладает более высокими прочностными свойствами при комнатной температуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
2. Колобнев И.Ф. Жаропрочность литейных алюминиевых сплавов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1973. 320 с.
3. Фридляндер И.Н., Антипов В.В., Колобнев Н.И., Якимов Е.Г. Конструкционные жаропрочные алюминиевые сплавы / В кн.: 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 172–180.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
5. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
6. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.01.2015).

7. Братухин А.Г., Фридляндер И.Н. Конструкционные алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности // *Авиационная промышленность*. 1987. №2. С. 43–46.
8. Бочвар А.А. *Металловедение*. М.: Металлургиздат, 1956. 494 с.
9. Петров Д.А. *Вопросы теории сплавов алюминия*. М.: Оборонгиз, 1951. 255 с.
10. Лужников Л.П. Деформируемые алюминиевые сплавы для работы при повышенных температурах. М.: Металлургия, 1965. 245 с.
11. *Промышленные алюминиевые сплавы: справ. изд.* 2-е изд. М.: Металлургия, 1984. 528 с.
12. *Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справ. изд.* 2-е изд. М.: Металлургия, 1984. 408 с.
13. Осипов К.А. *Вопросы теории жаропрочности металлов и сплавов*. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 288 с.
14. Лившиц Б.Г. *Физические свойства металлов и сплавов*. М.: Машгиз, 1956. 352 с.
15. *Электронная структура переходных металлов и химия их сплавов*. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1966. 230 с.
16. Мак Лин Д. *Границы зерен в металлах*. Пер. с англ. М.: Металлургиздат, 1960. 322 с.
17. Мондольфо Л.Ф. *Структура и свойства алюминиевых сплавов*. М.: Металлургия, 1979. 640 с.
18. Оглодков М.С., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Алексеев А.А., Лукина Е.А. Влияние термомеханической обработки на свойства и структуру сплава системы Al–Cu–Mg–Li–Zn // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №4. С. 7–11.
19. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Алюминийлитиевые сплавы / В кн. 75 лет. *Авиационные материалы*. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 163–171.
20. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминийлитиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 183–195.
21. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Антипов В.В., Каримова С.А., Рудаков А.Г., Оглодков М.С. Влияние коррозионной среды на скорость роста трещины усталости в алюминиевых сплавах // *Авиационные материалы и технология*. 2011. №1. С. 16–20.
22. Лощинин Ю.В., Пахомкин С.И., Фокин А.С. Влияние скорости нагревания при исследовании фазовых превращений в алюминиевых сплавах методом ДСК // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №2. С. 3–6.