

# ВОЗДЕЙСТВИЕ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

*В.К. АФАНАСЬЕВ, доктор техн. наук, профессор*  
*М.В. ПОПОВА, доктор техн. наук, доцент*  
*В.В. ГЕРЦЕН, научный сотрудник*  
*С.В. ДОЛГОВА, ст. преподаватель*  
*В.А. ЛЕЙС, аспирант*  
 (СибГИУ, г. Новокузнецк)

Поступила 23 октября 2013  
 Рецензирование 10 ноября 2013  
 Принята к печати 15 ноября 2013

**Попова М.В.** – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,  
 Сибирский государственный индустриальный университет,  
 e-mail: m.popova@rdtc.ru

Среда, в которой проводится термическая обработка металлических сплавов, во многом определяет такие ее параметры, как температура и время выдержки, а также окончательные свойства изделий. В статье обосновывается положение о том, что активность внутренних диффузионных процессов тесно связана с диффузией водорода, поэтому зависит от состава внешней среды и соотношения давления водорода внутри металла и в атмосфере печи. Приведены результаты исследования влияния различных сред с повышенным содержанием водорода на параметры закалки, старения и механические свойства промышленных литейных и деформируемых алюминиевых сплавов. В качестве сред при нагреве были использованы порошки окислов, пары углеводородов, карбамид. Показано, что выдержка алюминиевых сплавов в средах с повышенным содержанием водорода и азота ускоряет протекание в них фазовых превращений, тем самым способствует существенному сокращению времени термической обработки. Например, при нагреве в продуктах разложения карбамида время старения сокращается в 2-4 раза при одновременном повышении прочности и пластичности.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, внешняя среда, водород, термическая обработка, механические свойства.

## Введение

Изучение закономерностей влияния среды на механические характеристики различных материалов приобретает с каждым годом все большее значение в связи с рядом научных и инженерных проблем. К ним относятся, с одной стороны, прикладные задачи обеспечения высокой долговечности и надежности аппаратов и машин, с другой – отыскание оптимальных путей управления процессами деформирования и разрушения твердых тел, а также разработки технологии получения материалов с нужными структурой и механическими свойствами.

Воздействие внешней среды сказывается на всех этапах изготовления деталей: от обработки

расплава до термической обработки готовых изделий. В частности, внешняя среда, в которой проводится термообработка, во многом определяет ее параметры (температуру, время выдержки) и конечные свойства сплавов.

За последние годы достигнут значительный прогресс в изучении чувствительности механических свойств некоторых классов конструкционных материалов к влиянию среды (химико-термическая обработка сталей, титановых сплавов). Однако для производства изделий из промышленных алюминиевых сплавов все еще используют стандартные режимы термической обработки, разработанные много лет назад [1], не учитывающие зависимость процессов, протекающих внутри металла, от состава внешней

среды. Такой взгляд правомочен только в том случае, если при формировании представлений о сущности фазовых превращений не учитывается влияние элементов внедрения, в первую очередь, водорода. Долгое время считалось, что вследствие образования на поверхности алюминия и многих алюминиевых сплавов плотной окисной пленки для них химико-термическая обработка неперспективна.

В настоящее время доказана возможность образования новых свойств материалов, в том числе алюминиевых сплавов, при внедрении компонентов среды в кристаллическую решетку основы и получении новых систем внедрения или замещения. По мнению Г.В. Карпенко, общей проблемой влияния сред является присутствие водорода в металлах и влияние его на физико-механические свойства последних. Проблема «водород и металлы» состоит из трех частей: окклюзия водорода, проницаемость его через металл, влияние его на свойства металла [2].

В работах [3–6] показано, что водород активно участвует в развитии процессов растворения частиц промежуточных фаз при гомогенизации и выделения их при старении. Поэтому активность внутренних диффузионных процессов, которые тесно связаны с диффузией водорода, зависит от внешнего состава среды и соотношения давления водорода внутри металла и в атмосфере. Объяснением такого подхода может служить разработанный в конце 50-х годов прошлого века механизм У. Эванса. В этом механизме предусматривается ведущая роль водорода в развитии диффузионных процессов внутри металла под действием кислорода окружающей среды [7].

Авторами [5] предлагается принимать в основу представлений о процессах в алюминиевых сплавах существование тройной композиции «алюминий–легирующий элемент–водород». Водород в этом случае следует рассматривать как равноправный легирующий компонент, который способен решающим образом влиять на свойства сплавов [8]. Поэтому различные воздействия, предусматривающие изменения количества, состояния и особенностей распределения водорода в алюминии, могут изменить характер растворения промежуточных фаз (при нагреве под закалку) или их выделения из пересыщенного твердого раствора (при старении). Одним из таких воздействий может быть применение на-

гревов в средах, содержащих меньшее или большее количество водорода по сравнению с воздухом [9]. Наряду с этим согласно механизму [7] значительное влияние на развитие внутренних процессов в сплавах оказывает кислород окружающей среды.

Для подтверждения приведенных положений в данной работе была проведена серия экспериментов по изучению влияния внешней среды на процессы термической обработки алюминиевых сплавов и их механические свойства.

### **Материалы и методика экспериментальных исследований**

В качестве материалов исследования были взяты промышленные деформируемые и литейные алюминиевые сплавы, упрочняемые термической обработкой.

Из приготовленных по обычной технологии слитков вырезали образцы для испытаний на статическое растяжение. Термическую обработку (закалку и старение) проводили в лабораторных печах в обычной атмосфере, а также в атмосферах окислов, паров углеводородов и продуктов разложения карбамида. Электролитическое наводороживание образцов проводили на лабораторной установке в 20 %-й серной кислоте при плотности тока 0,15...0,3 А/дм<sup>2</sup> в течение 0,5...1,5 часа. Механические свойства образцов после термической обработки определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84. Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе OLYMPUS GX51 с программным обеспечением компании СИАМС в диапазоне увеличений 100...1000.

### **Результаты исследования и их обсуждение**

В первой части работы был проведен нагрев под закалку сплавов марок АК5М (АЛ7), АМг10ч (АЛ8) и АМг11 (АЛ22) в среде окислов  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$  и  $Fe_2O_3$ . Для этого из приготовленных по обычной технологии слитков вырезались образцы и укладывались в контейнер с окислами. После выдержки при 425...545 °С проводилась закалка в подогретой до 60...80 °С воде. Результаты определения механических свойств (табл. 1) показали возможность значительного

Таблица 1

**Влияние внешней среды на механические свойства алюминиевых сплавов после закалки**

Марка сплава	Режим термообработки	Механические свойства	
		$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
АК5М (АЛ7)	Закалка с 515 °С, с выдержкой:		
	на воздухе, 10 ч	240	9,0
	на воздухе, 2 ч	167	9,0
	в среде $Al_2O_3$ , 2 ч	245	9,0
АМг11 (АЛ8)	Закалка с 425 °С, с выдержкой:		
	на воздухе, 20 ч	234	1,5
	на воздухе, 12 ч	222	1,5
	в среде $Cr_2O_3$ , 12 ч	235	1,9
АМг10ч (АЛ22)	Закалка с 430 С, с выдержкой:		
	на воздухе, 12 ч	299	9,0
	на воздухе, 8 ч	246	10,5
	в среде $Fe_2O_3$ , 8 ч	299	9,1

сокращения времени нагрева под закалку при использовании окислов.

Сравнительное изучение микроструктуры закаленных образцов подтверждает наличие ускоряющего действия нагрева в окислах на растворение частиц промежуточных фаз и, следовательно, на увеличение концентрации легирующих элементов в твердом растворе. Однако длительный нагрев в среде окислов нежелателен, так как после растворения частиц развиваются процессы молизации водорода, что приводит к образованию пористости и снижению механических свойств. Такое действие окислов объясняется тем, что согласно механизму Эванса кислород внешней среды ускоряет диффузию водорода внутри металла. Это позволяет наметить пути для изучения природы промежуточных фаз и подтверждает ведущую роль диффузии водорода при их растворении.

Вторая часть экспериментов заключалась в изучении влияния внешней среды на старение сплавов, которое предусматривает различные стадии образования промежуточных фаз и за счет этого может быть способом упрочнения.

Установлено [5, 6], что нагрев и выдержка в течение 10 ч при температурах 80...100 °С и далее через 50 до 450 °С обуславливают два варианта изменения механических свойств. Это стадия упрочнения до 200 °С и разупрочнения

при 200...300 °С. Поэтому необходимо изучить влияние среды на упрочнение при более низких температурах. При таком исследовании предусматривалось использование сред, содержащих избыточное количество водорода, поскольку температуры нагрева низкие и можно ожидать диффузию лишь тех элементов, которые имеют наибольшую подвижность. К числу таких элементов, прежде всего, относится водород [10]. Поэтому литые или закаленные по стандартному режиму образцы из сплавов различных систем подвергались старению при принятых температурах в газообразной среде углеводородов. Для этого трансформаторное масло, уайт-спирит и керосин подавались в закрытый фарфоровый тигель, помещенный в муфельную печь со скоростью 8 капель в минуту.

Полученные результаты механических испытаний наглядно показывают, что применение продуктов разложения углеводородов позволяет существенно сократить время старения без снижения прочности и пластичности (табл. 2). Причем такая обработка даже для сплавов, не подвергающихся закалке, дает сокращение времени старения в 1–4 раза, что открывает перспективу значительной экономии электроэнергии. Такое сильное влияние среды с избыточным содержанием водорода можно объяснить следующим образом.

Влияние внешней среды на время старения и механические свойства алюминиевых сплавов

Марка сплава	Режим термической обработки	Механические свойства		
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
АК12 (АЛ2)	Старение при 300 °С выдержкой:			
	на воздухе 4 ч	155	110	3,5
	в атмосфере трансформаторного масла 1 ч	155	140	3,5
	в атмосфере керосина 1 ч	158	100	3,0
АК5М (АЛ7)	Закалка с 535 °С, 5 ч, старение при 200 °С выдержкой:			
	на воздухе 4 ч	240	140	12,0
	в атмосфере уайт-спирита 2 ч	240	190	14,0
АК7ч (АЛ9)	Закалка с 535 °С, 5 ч, старение при 200 °С с выдержкой:			
	на воздухе 5 ч	160	100	4,0
	в атмосфере трансформаторного масла 1 ч	220	200	6,0

Ранее [6] было экспериментально установлено, что увеличение количества водорода любым способом приводит к усилению охрупчивания алюминия и его сплавов в интервале 200...300 °С, однако рассмотрение особенностей изменения прочности в интервале до 200 °С не проводилось. Поэтому в дополнение к [6] было исследовано влияние водорода на развитие старения при нагреве до температур ниже 200 °С, обычно применяемых для упрочнения деформируемых алюминиевых сплавов. Для этого алюминиевые сплавы АК6, АВ и В95 после закалки в воде подвергали электролитическому наводороживанию в 20 %-й серной кислоте при плотности тока 0,15...0,3 А/дм<sup>2</sup> в течение 0,5...1,5 часа. Старение закаленных образцов проводилось немедленно после наводороживания, так как после снятия разности потенциалов происходит быстрое удаление водорода из металла.

Результаты, приведенные в табл. 3, показывают, что водород, непосредственно введенный в сплавы путем электролитического наводороживания, оказывает существенное влияние на изменение механических свойств алюминиевых сплавов после старения.

Как видно из приведенных данных, использование электролитического наводороживания позволяет сократить время старения в 2–6 раз, снизить температуру старения на 35...65 °С с одновременным сохранением или даже повышением (на 2...11 %) прочности. Такое сильное влияние водорода подтверждает его участие в развитии ранних подготовительных стадий об-

разования выделений промежуточных фаз, которые приводят к охрупчиванию при более высоких температурах (200...300 °С). С другой стороны, эти результаты подтверждают влияние внешней среды (например, содержащей продукты разложения углеводов), которая также увеличивает содержание водорода, но, видимо, не обеспечивает столь сильного наводороживания, а потому слабее влияет на интенсивность диффузионных процессов внутри металла.

Следует заметить, что создание искусственной среды с повышенным содержанием водорода не меняет коренным образом ее состав, т. е. по-прежнему эта среда состоит из воздуха (N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>) с добавкой СН. Учитывая преобладающее количество азота в этой смеси, можно ожидать, что изменение соотношения «азот–кислород–водород» может привести к регулированию изменения свойств при нагреве. Так, в практике химико-термической обработки стальных изделий часто используются процессы, предусматривающие насыщение азотом. Однако среды, используемые при таком насыщении, содержат также и водород, образующийся при разложении аммиака или специально вводимый в эндогаз.

Исходя из этого можно предположить, что газовая среда, состоящая из воздуха с избыточным содержанием водорода и азота, способна оказывать влияние на процессы распада пересыщенного твердого раствора при старении. Для подтверждения этого предположения были проведены исследования особенностей изменения механических свойств сплавов АК5М (АЛ7)

Таблица 3

**Влияние электролитического наводороживания на механические свойства алюминиевых сплавов**

Марка сплава	Режим термообработки			Механические свойства	
	Закалка	Время наводороживания, ч	Старение	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
АК6	обычный режим			396	12,4
	495...500 °С, 40 мин	–	165 °С, 6 ч		
	режим с наводороживанием			421 445 404 413 412 398	10,1 11,7 14,5 15,4 13,0 14,5
	495...500 °С, 40 мин	0,5	165 °С, 2 ч		
		1,0	165 °С, 6 ч		
		0,5	130 °С, 3 ч		
		1,0	130 °С, 3 ч		
		0,5	100 °С, 3 ч		
1,0		100 °С, 3 ч			
АВ	обычный режим			372	16,7
	515...525 °С, 50 мин	–	150–160 °С, 6 ч		
	режим с наводороживанием			379 408 369 413	16,2 17,0 14,3 11,4
	515...525 °С, 50 мин	1,0	150–160 °С, 1 ч		
		1,0	150–160 °С, 2 ч		
		1,0	150–160 °С, 3 ч		
		1,0	120 °С, 3 ч		
		1,0	120 °С, 3 ч		
1,0		120 °С, 3 ч			
В95	обычный режим			640	12,5
	465...480 °С, 60 мин	–	135–145 °С, 16 ч		
	режим с наводороживанием			653 646	9,6 8,8
	465...480 °С, 60 мин	1,5	135–145 °С, 7 ч		
		1,5	135–145 °С, 4 ч		

Таблица 4

**Влияние старения в продуктах разложения карбамида на механические свойства алюминиевых сплавов**

Марка сплава	Режим термической обработки	Механические свойства		
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
АЛ7	Закалка с 535 °С, 5 ч, старение при 150 °С с выдержкой: на воздухе 4 ч в продуктах разложения карбамида 1 ч	233	140	10,0
		260	153	13,7
Д1	Закалка с 510 °С, 35 мин, старение при 180 °С с выдержкой: на воздухе 13 ч в продуктах разложения карбамида 6 ч	196	140	5,7
		237	184	6,0

и D1 после старения в продуктах разложения карбамида  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ . Результаты механических испытаний, приведенные в табл. 4, показывают, что использование среды с повышенным содержанием водорода и азота позволяет уменьшить время старения в 2–4 раза при одновременном повышении не только прочности, но и пластичности алюминиевых сплавов.

### Выводы

Таким образом, экспериментально подтверждено влияние состава внешней среды на процессы фазовых превращений алюминиевых сплавов при термической обработке. Среда с повышенным содержанием кислорода, водорода, а также совместно водорода и азота способствуют активизации внутренних диффузионных процессов в алюминиевых сплавах, что делает возможным сокращение времени термической обработки при сохранении или даже повышении механических свойств. Наиболее заметно воздействие сред изученного состава на интенсивность низкотемпературного старения алюминиевых сплавов. Установлено, что при нагреве в продуктах разложения карбамида время старения сокращается в 2–4 раза при одновременном повышении прочности и пластичности.

### Список литературы

1. Колобнев И.Ф. Термическая обработка алюминиевых сплавов / И.Ф. Колобнев. – М.: Металлургия, 1966. – 394 с.

2. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов / Г.В. Карпенко. – Киев: Наукова думка, 1976. – 124 с.

3. Афанасьев В.К. Особенности структуры сплавов Al–Mg с титаном и цирконием / В.К. Афанасьев, А.А. Абрамов // МиТОМ. – 1977. – № 6. – С. 18–20.

4. Афанасьев В.К. Об особенностях влияния водорода на распад алюминиевых твердых растворов / В.К. Афанасьев // Физика и химия обработки материалов. – 1977. – №4. – С. 16–17.

5. Афанасьев В.К. Водородная хрупкость алюминия и его сплавов / В.К. Афанасьев, В.Н. Лебедев, А.А. Мельгунов. – М.: ЦНИИ информации, 1984. – 332 с.

6. Афанасьев В.К. О связи охрупчивания после нагрева в интервале 200...300 °С со служебными свойствами алюминиевых сплавов / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, В.В. Ушакова // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1995. – №10. – С. 45–47.

7. Эванс У. О механизме химического растрескивания / У. Эванс // Коррозионное растрескивание и хрупкость: сб. науч. тр. – М.: Металлургиздат, 1961. – С. 149–155.

8. Афанасьев В.К. Водород-легирующий элемент алюминиевых сплавов / В.К. Афанасьев, А.Н. Прудников, М.В. Попова [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 6. – С. 36–39.

9. Афанасьев В.К. Нетрадиционные способы термической обработки алюминиевых и железных сплавов / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, Н.Б. Лаврова [и др.] // Обработка металлов. – 2009. – № 3. – С. 3–8.

10. Фромм Е. Газы и углерод в металлах: пер. с нем. / Е. Фромм, Е. Гебхардт. – М.: Металлургия, 1980. – 712 с.

### Obrobotka metallov

N 4(61), October–December 2013, Pages 28-34

### Influence of external environment on forming of aluminum alloys characteristics under heat treatment

V.K. Afanasjev, M.V. Popova, V.V. Gerzen, S.V. Dolgova, V.A. Leis

Siberian State Industrial University, Kirov st., 42,  
Novokuznetsk, 654007, Russia

E-mail: m.popova@rdtc.ru

Received 23 October 2013

Revised 10 November 2013

Accepted 15 November 2013

## Abstract

The medium, in which the heat treatment of metallic alloys is carried out, largely determines its parameters such as temperature and time of exposure, as well as the properties of the final product. The state that the activity of the internal diffusion process is closely related to the diffusion of hydrogen and is therefore dependent on the composition ratio and the ambient pressure of hydrogen within the metal in the furnace atmosphere is explained in the article. The results of the study of the influence of different mediums with a high content of hydrogen on the parameters of hardening, aging and mechanical properties of industrial cast and wrought aluminum alloys are adduced. The following mediums were used for heating: powders of oxides, hydrocarbon vapours, carbamide. It is shown that holding of aluminum alloys in mediums with a high content of hydrogen and nitrogen, that promotes the phase transformation and contributes to a significant reduction in the time of heat treatment. For example, while heating of carbamide decomposition products, the aging time reduces 2-4 times while increasing the strength and ductility.

Keywords: aluminum alloys, environment, hydrogen, heat treatment, mechanical properties.

## References

1. Kolobnev I.F. *Termicheskaja obrabotka aljuminievjyh splavov* [Heat treatment of aluminum alloys]. Moscow, Metallurgija, 1966. 394 p.
2. Karpenko G.V. *Vlijanie sredy na prochnost' i dolgovechnost' metallov* [Effect of temperature on the strength and durability of metal]. Kiev, Naukova dumka, 1976. 124 p.
3. Afanas'ev V.K., Abramov A.A. Osobennosti struktury splavov Al–Mg s titanom i cirkonijem [Structure of Al–Mg alloys with titanium and zirconium]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov - Metal Science and Heat Treatment*, 1977, no. 6, pp. 18-20.
4. Afanas'ev V.K. *Fizika i himija obrabotki materialov*, 1977, no. 4, pp. 16-17.
5. Afanas'ev V.K., Lebedev V.N., Mel'gunov A.A. *Vodorodnaja hrupkost' aljuminija i ego splavov* [Hydrogen brittleness of aluminum and its alloys]. Moscow, CNII informacii, 1984. 332 p.
6. Afanas'ev V.K., Popova M.V., Ushakova V.V. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija*, 1995, no.10, pp. 45-47.
7. Jevans U. *O mehanizme himicheskogo rastreskivanija* [On the mechanism of chemical cracking]. *Korrozionnoe rastreskivanie i hrupkost': sbornik nauchnyh trudov* [Stress corrosion cracking and brittleness: Collection of proceedings]. Moscow, Metallurgizdat, 1961, pp. 149-155.
8. Афанасьев В.К., Прудников А.Н., Попова М.В., et al. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija*, 2005, no. 6, pp. 36–39.
9. Афанасьев В.К., Долгова С.В., Лаврова Н.Б. *Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty)*, 2009, no. 3, pp. 3–8.
10. Fromm E., Gebhardt E., eds. *Gase und Kohlenstoff in Metallen (Gases and Carbon in Metals)*. Berlin, Springer-Verlag, 1976. 636 p. (Russ. ed.: Fromm E., Gebhardt E. *Gazy i uglerod v metallah*. Moscow, Metallurgija, 1980. 712 p.