

Металлургия

АШИНСКОЕ
МЕДИЦИНСКОЕ
ОБЩЕСТВО

№ 1
2017



Металлургия

МАШИНОСТРОЕНИЯ

2017

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

• СО Д Е Р Ж А Н И Е •

ПЛАВКА. ОБРАБОТКА РАСПЛАВА • MELTING. MELT TREATMENT

- Бестужев А.Н., Бестужев Н.И.** Тенденции развития технологии модифицирования высококачественных чугунов • **Bestouzhev A.N., Bestouzhev N.I.** Trends in the development of technology of modification of high-quality cast iron ...2
- Ву Ван Гюи, Балановский А.Е., Кондратьев В.В.** О поверхностном модифицировании стальных литых заготовок в процессе плазменно-дугового переплава • **Wu Wan Gui, Balanovsky A.Y., Kondratyev V.V.** On the surface inoculation of steel castings in the process of plasma-arc remelting ...9
- Баженов В.Е., Фадеев А.В., Колтыгин А.В., Деев В.Б., Ефремов А.А.** Исследование фазового и химического состава корундомуллитовых тиглей для плавки никелевых сплавов • **Vazhenov V.E., Fadeev A.V., Koltygin A.V., Deyev V.B., Efremov A.A.** Investigation of phase and chemical composition of alumina-mullite crucibles for melting of Ni-based alloys ...16

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ • MODERN MATERIALS

- Романюк В.В., Никитин В.И., Никитин К.В.** Синтезирование силуминов с использованием отходов деформируемых сплавов • **Romanyuk V.V., Nikitin V.I., Nikitin K.V.** Synthesizing silumins using scrap of aluminum wrought alloys ...21
- Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Мямин С.В.** Механические свойства пеноалюминия, армированного титаном • **Kovtunov A.I., Khokhlov Y.Y., Myamin S.V.** Mechanical properties of foamed aluminum reinforced with titanium ...26
- Усков Д.И., Беяев С.В., Усков И.В., Гильманшина Т.Р., Губанов И.Ю.** Разработка составов ювелирных сплавов системы Pd-Cu-Ag • **Uskov D.I., Belyayev S.V., Uskov I.V., Gilmanshina T.R., Gubanov I.Y.** Development of compositions of jewellery alloys of the Pd-Cu-Ag system ...30

ТЕХНОЛОГИИ XXI ВЕКА • XXI CENTURY TECHNOLOGIES

- Афанасьев В.К., Малюх М.А., Попова М.В., Долгова С.В., Лаврова Н.Б.** Водород и термическая обработка алюминиевых сплавов • **Afanasyev V.K., Malyukh M.A., Popova M.V., Dolgova S.V., Lavrova N.B.** Hydrogen and heat treatment aluminum alloys ...33
- Мочалин И.В., Тен Э.Б.** Получение непрерывнолитых проволочных заготовок из Cu-Ni- и Ni-сплавов • **Mochalin I.V., Ten E.B.** Production of continuous-cast wire blanks from Cu-Ni and Ni alloys ...41
- Сулицин А.В., Мысик Р.К., Брусницын С.В.** Образование газовой пористости в непрерывнолитых заготовках из меди • **Sulitsyn A.V., Mysik R.K., Brusnitsyn S.V.** Formation of gas porosity in continuous cast copper castings ...44

ИНФОРМАЦИЯ. ХРОНИКА • INFORMATION. CHRONICLE

- К 100-летию со дня рождения Г.Г. Ефименко.** Жизнь во имя науки и образования ...48
- Российскую промышленность ожидает подъем** ...51

С НОВЫМ ГОДОМ, ДОРОГИЕ ДРУЗЬЯ!

ства автопарка в стране, который прирос за прошлый год на 1,5%. Авторемонтные услуги могут закончить текущий год увеличением до 8% потребления АКМ за счет стабилизации покупательской способности граждан.

Хотя само машиностроение переживает не лучшие времена – отмечают аналитики. Минувший год был отмечен 5%-ным падением объемов потребления защитных материалов в этой отрасли: из-за падения потребительского и инвестиционного спроса. Также негативное влияние оказали повышение стоимости кредитных ресурсов и высокие цены на материалы. Однако российские машиностроители начинают адаптироваться к новым условиям, а отдельные отрасли показывают даже существенную динамику: например, производство кузнечно-прессовых машин выросло в аналогичный период на 27%, а сельхозтехники на 20%. Но даже в сложной кризисной ситуации машиностроение ожидает тенденция к ежегодному росту на 2...4% по объемам потребления спецпокрытий.

Тяжелее всего пришлось рынку автомобилестроения, на котором потребление защитных материалов в 2015 г. снизилось на 30%, и еще на 16% в 2016 г. (цифры не финальные, могут корректироваться по результатам года). Однако для экспертов уже очевидно, что с 2017 г. начнется затяжное улучшение показателей: по 4...7% в год.

Похожая ситуация с падением потребления защитных покрытий была в период кризиса на рынке вагоностроения, где наблюдалось 46%-ное падение объемов, а также на рынке моторостроения – на 13%, энергетики – 15%. Каждую из этих отраслей в 2017...2018 гг. ожидает ежегодное увеличение спроса спецпокрытий – от 2 до 8%. А значит – общее улучшение ситуации в промышленности России и экономики страны, в целом.

Стоит подчеркнуть, что свои прогнозы аналитики АУЗ и Mega-Research выстраивали, исходя из среднегодовой стоимости барреля нефти ~ \$65, с учетом ослабления санкций к России на мировой арене. Как показывают последние политические события, принятие в расчет таких показателей может быть вполне оправдано. В противном случае, внутри рынка может сформироваться нехватка материалов для внутренних нужд, так как основная часть производимых качественных товаров может пойти на экспорт, как более конкурентная по цене, по сравнению с зарубежными аналогами. Получит ли внутренний рынок взамен такие же качественные товары – сомнительно. На начало 2016 г. доля импорта в потреблении защитных покрытий уже составляла 40%. При этом, большая часть импортных защитных покрытий поставляется для мебели (импорт – 90%), рулонных металлов (импорт – 90%), сферы судостроения (импорт – 80%) и автомобилестроения (импорт – 73%), где наиболее высокие потребительские требования к защитным материалам. А вот крупнейшей отраслью потребления защитных покрытий в нашей стране является производство металлоконструкций, на долю которого в прошлом году приходился 31% рынка. Второй по объему отраслью было производство автомобилей, причем, как легковых, так и грузовых, общая доля которых составила 11,4% от общего объема рынка. Тенденции рынка могут сохранить этих лидеров и по результатам 2016 г.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

- **Бех Николай Иванович** (председатель)
Д-р техн. наук, Президент
ОАО «Звезда Энергетика»
- **Афанасьев Владимир Константинович**
Д-р техн. наук, проф. кафедры
материаловедения, литейного и сварочного
производства СибГИУ
- **Малиновский Владимир Сергеевич**
Канд. техн. наук, Президент ООО НТФ «Экта»
- **Марукович Евгений Игнатьевич**
Академик НАН Респ. Беларусь,
Директор Института технологии металлов
НАН Беларуси
- **Найдек Владимир Леонтьевич**
Академик НАН Украины, Почетный Директор
Физико-технологического института
металлов и сплавов НАН Украины
- **Поддубный Анатолий Никифорович**
Д-р техн. наук, Советник ген. директора
АО «Инженерный центр ядерных
контейнеров»
- **Ри Хосен**
Д-р техн. наук, проф. кафедры «Литейное
производство и технология металлов»
Тихоокеанского государственного универ-
ситета
- **Тен Эдис Борисович**
Д-р техн. наук, проф. кафедры «Технологии
литейных процессов» НИТУ «МИСиС»
- **Тихонов Аркадий Константинович**
Д-р техн. наук, проф., Советник по науке
ОАО «АвтоВАЗ»
- **Яскевич Инна Авдеевна**
Главный редактор

ИЗДАТЕЛЬ

ООО «Литейное производство»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

И.А. Яскевич

ЖУРНАЛ ГОТОВИЛИ

А.И. Батышев

А.Е. Зевакина

Е.В. Трушина

НАШ АДРЕС

111394, Москва,
ул. Мартеновская,
д. 39, корп. 2, офис 4

ТЕЛЕФОН/ФАКС

8 (495) 303-85-81

E-MAIL: lp@niit.ru

САЙТ www.foundrymag.ru

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Металлургия Машиностроения», осуществляется только с разрешения редакции

Сдано в набор 01.12.2016

Подписано в печать 05.01.2017

Формат 60x80 1/8

Отпечатано в ООО «Печатное дело»

127055, г. Москва, Вадковский пер.,
д. 12, офис 40

Цена договорная

УДК 669.715: 621.78

- В.К. Афанасьев, М.А. Малюх, М.В. Попова, С.В. Долгова, Н.Б. Лаврова
- V.K. Afanasyev, M.A. Malyukh, M.V. Popova, S.V. Dolgova, N.B. Lavrova

Водород и термическая обработка алюминиевых сплавов

Hydrogen and thermal treatment of aluminum alloys

Введение

Существующие способы получения Al и его сплавов предусматривают наличие в них водорода [1], в связи с чем предлагалось [2] считать сплавы Al-Me, прежде всего, тройными Al-Me-H. Однако до настоящего времени при рассмотрении основных режимов ТО и ее последствий третий компонент системы полностью игнорируется [3] или же рассматриваются лишь отрицательные черты его влияния (микро- и макропористость, расслоение при прокатке, дефектность сварных соединений и др.). Для развития представлений о сути процессов, протекающих при нагреве, целесообразно рассмотреть возможное участие водорода в формировании свойств Al-сплава при гомогенизации, старении и пережоге, что позволит глубже понять природу свойств и послужит развитию процессов их ТО.

Методика исследований

Сплавы выплавляли в закрытой лабораторной печи сопротивления, после чего в сплав порционно вводили магний Mg1 – 6 и 11% для получения, соответственно, промышленных сплавов АМг6 и АМг10. Из слитков изготавливали образцы для ТО и испытания механических свойств.

ТО предусматривала нагрев 3...116 ч в воздушной среде при $435 \pm 5^\circ\text{C}$, с последующим охлаждением в кипящей воде. При исследовании влияния рафинирования гексахлорэтаном и тетрафторэтиленом на структуру и механические свойства закаленных сплавов АМг6 и АМг10 количество р а ф и н и р у -

Предлагается считать, что сплавы *алюминий – металл* – не двойные, а тройные (Al-Me-H). Установлено, что водород принимает активное участие в процессах растворения или образования промежуточных фаз, регулирует упрочнение и разупрочнение. Наиболее эффективные способы изменения газосодержания – обработка расплава, выбор условий кристаллизации и термическая обработка (ТО). Рассматривается участие водорода в формировании свойств Al-сплавов типа Al-Mg при гомогенизации, старении и пережоге. Показана возможность получения оптимального сочетания их микроструктуры и механических свойств.

Ключевые слова

Водород, алюминиевые сплавы, гомогенизация, старение, пережог.

АННОТАЦИЯ

SUMMARY

It is proposed to assume that the alloys of the aluminum – metal are not double but triple (Al-Me-H). It is found that hydrogen is actively involved in the processes of dissolution or formation of intermediate phases, adjust hardening and softening. The most effective ways of changing the gas content, should be considered the treatment of the melt, the choice of crystallization conditions and heat treatment. To date, however, when considering the basic heat treatment and its effects on the third component of the system or completely ignored, or considers only the negative aspects of his influence (micro- and macroporosity, delamination during rolling, defectiveness of welded joints, etc.). Examines the involvement of hydrogen in the formation of the properties of aluminum alloys of type Al-Mg with homogenization, aging and burnout.

Key words

Hydrogen, aluminum alloys, homogenization, aging, burnout.

ющих веществ (РВ) составляло 0,1...1,5% от массы расплава. Металлографический анализ, изучение микроструктуры, определение механических свойств и газосодержания проводили стандартными методами.

Результаты и обсуждение

Гомогенизация

Основное назначение этой операции ТО – в устранении нежелательных последствий кристаллизации, т.е. в уменьшении физической и химической неоднородностей строения сплава.

Поскольку неоднородность выражается, прежде всего, в образовании выделений промежуточных фаз и локальном распределении дефектов строения, гомогенизацию в практическом плане следует рассматривать как нагрев при определенных температурах, обеспечивающих получение однофазного состояния, с равномерным распределением компонентов и примесей в объеме зерна.

В значительной мере это удастся получить для сплавов систем Al–Cu, Al–Mg, Al–Zn–Mg–Cu, но для сплавов на основе Al–Si с большим содержанием эвтектики нагрев и выдержка под солидусом слабо влияют на структуру литого металла.

Поэтому основное внимание было уделено сплавам тех систем, которые, при ограниченной растворимости, имеют достаточную высокотемпературную область однофазного состояния. К их числу следует, прежде всего, отнести сплавы Al–Mg, являющиеся основой литейных высокопрочных. В отношении ТО они интересны

тем, что гомогенизация и последующая закалка в кипящей воде для них – это окончательная обработка.

В связи с этим, с помощью практических приемов определяется оптимальное время гомогенизации, предусматривающее полное растворение выделений Al_3Mg_2 (β -фазы) и получение максимальных механических свойств.

Для выяснения особенностей процессов, протекающих при нагреве, необходимо изучение изменения свойств при специальных нарушениях оптимального режима с привлечением представлений об участии водорода в диффузии легирующих элементов (ЛЭ).

Одним из таких нарушений может быть увеличение времени нагрева при температуре гомогенизации. С этой целью изучали свойства двойных сплавов с 6...12% Mg после разного времени нагрева при $435 \pm 5^\circ C$ и охлаждения в кипящей воде. Время нагрева изменяли от 3 до 116 ч.

В качестве примера, в **табл. 1** показаны результаты испытаний двойных сплавов с 6 (числитель) и 11% Mg (знаменатель).

Видим, что действие нагрева сводится первоначально к подъему, а затем – к резкому спаду прочности и пластичности. Анализ микроструктуры и процесса разрушения образцов показал, что причина снижения свойств – в образовании развитой микро- и макропористости, расположенной по местам β -фазы.

Определение содержания водорода в закаленных сплавах разной прочности указывает на аналогичную зависимость его от времени нагрева.

Так, при максимальной прочности определяемое методом вакуумной экстракции количество водорода составляет 3...5 у литых и до 20...80 $cm^3/100\text{ г}$ – у деформированных Al–Mg-сплавов. Увеличение времени нагрева приводит к уменьшению количества водорода и после 116 ч. Оно может составлять лишь

Таблица 1

Время нагрева, ч	Механические свойства Al–6%Mg / Al–11%Mg			
	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ
	МПа		%	
–	147/–	207/175	12,3/2,0	24,2/9,6
3	138/185	273/285	26,0/18,5	47,0/23,5
6	135/196	265/260	25,2/12,3	46,0/21,0
12	135/207	257/345	26,0/20,7	40,1/41,7
24	138/210	262/352	23,0/21,5	33,0/32,7
48	140/197	248/302	19,0/20,0	27,6/28,0
72	125/196	220/283	16,0/15,3	26,5/24,6
96	–/192	–/286	–/11,5	–/19,5
116	–/175	–/262	–/10,9	–/19,0

0,2...0,6 см³/100 г. В связи с этим можно считать, что *водород – важный фактор прочности и, если он находится в твердом растворе, то сплав имеет наибольшие ее значения.* Поскольку пористость ответственна за снижение механических свойств, рассмотрим механизм ее образования.

Известно, что β-фаза, затвердевающая в последнюю очередь, содержит в своем составе значительно больше водорода, чем α-твердый раствор.

При нагреве водород и магний растворяются в Al и свойства сплавов повышаются, так как в них исчезают хрупкие участки (β-фаза), контролирующие прочность и пластичность [3].

В дальнейшем, при увеличении времени нагрева, преобладающее влияние на свойства сплава оказывает поведение водорода в твердом растворе. Этот раствор неустойчив и распадается во времени.

Поскольку водород наиболее подвижен и, начиная с 300°C, покидает Al, при гомогенизации (нагрев ≥ 400°C) скорость выделения газа значительна. Одна его часть уходит

в атмосферу, что сопровождается потемнением поверхности образцов, а другая – в места наибольших растягивающих напряжений (места β-фазы).

В результате, при изучении микроструктуры можно установить, что травимость этих мест с увеличением времени нагрева повышается. Такие участки принято называть *микрпористостью.*

В конечном итоге, процесс распада твердого раствора водорода в Al приводит к дальнейшему увеличению содержания водорода, его молидации в местах β-фазы и образованию трещин с большим радиусом закругления, которые хорошо обнаруживаются на нетравленных шлифах – это и есть *макропоры.*

Это хорошо согласуется с результатами работы [4], где авторы установили, что первичная пористость в литых сплавах образуется по выделениям β-фазы в литых сплавах.

При кристаллизации сплавов невозможно получить одинаковый размер выделений β-фазы по всему сечению слитка или отливки.

Процесс образования твердого раствора и его распад, с

образованием пористости в разных местах, неодинаков во времени. Поэтому практически при любом времени нагрева следует ожидать образования пористости, снижающей однородность свойств сплавов после их пластической деформации при испытаниях или эксплуатации.

Таким образом, изменение времени гомогенизации позволило установить ведущую роль водорода в формировании свойств сплавов, подвергающихся закалке с получением структуры твердого раствора.

Поэтому следует ожидать, что, при прочих равных условиях, разные воздействия, изменяющие количество водорода, при постоянном содержании официальных ЛЭ, могут существенно повлиять на результат гомогенизации.

Из таких воздействий, прежде всего, рассмотрим *обработку расплава и его кристаллизацию.* Для этого исследовали влияние рафинирования на структуру и механические свойства сплавов АМгб и АМг10. Для рафинирования расплавов были применены два способа.

Один известный – гексахлорэтаном C₂Cl₆, а второй – специально разработанный для дегазации расплавов, предусматривающий применение продуктов разложения полимера тетрафторэтилена C₂F₄ и отличающийся большей эффективностью, по сравнению с первым [5].

Количество рафинирующих веществ (РВ) составляло 0,1...1,5% от массы расплава. Из полученных заливкой при 710±10°C и кристаллизацией в подогретой до 250...300°C металлической

Таблица 2

№ п/п	Количество РВ, %	σ _{0,2}	σ _в	δ	ψ
		МПа		%	
1	–	137/211	278/370	15,6/17,7	23,7/23,7
2	0,25	137/197	295/365	23,0/16,8	32,8/23,8
3	1,0	145/222	296/407	23,6/32,6	30,3/34,9
4	1,5	143/215	290/401	21,5/25,5	25,1/40,3
5	0,25	140/221	325/373	27,6/23,0	32,6/26,0
6	1,0	138/202	305/382	24,8/21,8	30,0/35,3
7	1,5	138/217	300/372	25,0/27,7	35,2/36,8

Примечание. РВ: 2...4 – C₂Cl₆, 5...7 – C₂F₄; 1 – без обработки.

Таблица 3

Место вырезки образцов	Механические свойства				Содержание водорода, см ³ /100 г	Полнота растворения β-фазы, %
	σ _{0,2}	σ _B	δ	ψ		
	МПа		%			
А	210	375	26,5	46,0	68,0	100
Б	195	325	23,6	34,0	42,5	85
В	185	270/143	13,5/2,5	18,0/-	21,6/-	100+развитая пористость

Примечание. А...В – донная, средняя и прибыльная часть, соответственно.

форме слитков вырезали образцы для ТО, которая заключалась в гомогенизации при 435±5°С в течение 12 и 4 ч (АМг6 и АМг10, соответственно), с последующим охлаждением в кипящей воде.

Количество основного ЛЭ – Mg – оказалось в пределах разброса, обычного для литейных сплавов, и не выходило за пределы марки сплавов.

Результаты испытания механических свойств закаленных сплавов (табл. 2, в числителе – АМг6, знаменателе – АМг10) показывают, что рафинирование позволяет получить более благоприятное сочетание прочности и пластичности, что особенно хорошо видно на примере сплава АМг6.

Из сравнения свойств сплавов, обработанных и не обработанных C₂Cl₆ и C₂F₄, видно, что рафинирование позволяет сократить время гомогенизации до 4 ч, с получением требуемых свойств, в то время как обычный режим требует 12-ч нагрева.

С повышением содержания Mg количество водорода в расплаве увеличивается, и поэтому для сплава АМг10 эффективны большие количества РВ. Фторопласт-4 для этого сплава оказался менее пригодным, поскольку в присутствии повышенного содержания водорода он взаимодействует с расплавом и образует углеродные соединения, которые снижают механические свойства заготовки.

Однако, в целом, можно заключить, что мнение о гомогенизации как о процессе, зависящем от содержания водорода в расплаве, подтверждено влиянием обработки расплава.

Помимо возможности сокращения времени нагрева за счет рафинирования расплава, другое воздействие, изменяющее содержание водорода и, тем самым, влияющее на гомогенизацию, – это процесс кристаллизации.

Известно, что при переходе из жидкого состояния в твердое значительная часть водорода удерживается в сплавах. Так как при кристаллизации слитков и отливок всегда имеются участки быстро и медленно охлажденные, существует возможность неравномерного распределения водорода.

Например, в слитках из сплава Al–11%Mg количество водорода составляет – 1,78 в донной части, 1,12 в средней и 0,67 см³/100 г в прибыльной. Заливкой сплава в холодную металлическую форму можно увеличить содержание водорода до 2,5; 1,62; 1,20 см³/100 г для донной, средней и прибыльной частей, соответственно.

Изучение изменений микроструктуры литого сплава показало, что именно в донной части образуется наибольшее количество выделений β-фазы, а величина зерна – наименьшая (рис. 1), что также хорошо согласуется с работой [1]. В связи с этим можно ожидать, что интенсивность диффузионных процессов будет больше в

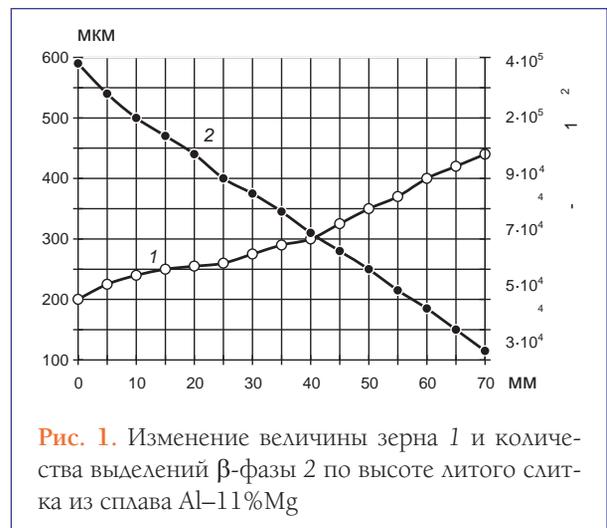


Рис. 1. Изменение величины зерна 1 и количества выделений β-фазы 2 по высоте литого слитка из сплава Al–11%Mg

тех участках слитков, где содержание водорода наиболее высокое.

Для подтверждения этого из разных участков слитка вырезали образцы и 6 ч нагревали при $435 \pm 5^\circ\text{C}$, с последующим охлаждением в кипящую воду. Данные **табл. 3** показывают, что низкие прочность и пластичность обусловлены наличием нерастворившихся выделений β -фазы. Наибольшие механические свойства в донной части свидетельствуют о наиболее полной гомогенизации сплава.

Следует отметить, что в прибыльных образцах протекают два процесса, снижающих свойства заготовок. Это – *растворение фазы*, с перераспределением водорода в твердый раствор и в уже образовавшиеся при кристаллизации поры, а также *диффузия водорода* из твердого раствора в атмосферу и поры.

Поэтому в **табл. 3** показаны максимальные и минимальные значения свойств. Несмотря на это, сравнение свойств образцов из средней и донной частей слитка указывает на перспективность учета роли водорода в представлениях о сути процессов при гомогенизации. Поэтому, основываясь на литературных данных и приведенных результатах исследования, процессы, протекающие при гомогенизации, можно представить следующим образом.

Основные факторы, управляющие развитием гомогенизации, – содержание ЛЭ и условия приготовления сплавов, изменяющие содержание водорода.

Как отмечалось выше, двойные Al-сплавы следует считать сплавами Al-Me-H. При нагреве развитие диффузионных процессов, предусматривающих растворение выделений хрупких фаз, происходит тем интенсивнее, чем больше водорода содержится в сплаве, поскольку среди компонентов сплава только один водород имеет наибольшую диффузионную подвижность, так как он отличается наименьшим размером.

Поскольку после кристаллизации наибольшая часть водорода находится в выделениях промежуточных фаз, а наименьшая растворена в Al, гомогенизация начинается с удаления водорода из Al в атмосферу и перераспределения его из выделений в алюминий.

Эти два конкурирующих процесса имеют разную скорость. Давление водорода в выделениях больше, поэтому 2-ой процесс опережает 1-ый и создаются условия для образования пересыщенного твердого раствора водорода и ЛЭ в алюми-

нии. Такой раствор отличается наиболее высокими механическими свойствами, но неустойчив.

Его распад сопровождается образованием пористости при дальнейшем нагреве при температурах гомогенизации, либо образованием трещин во времени, с формированием характерной ячеистой структуры [6].

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют об активном участии водорода в формировании свойств Al-сплавов при гомогенизации и позволяют наметить пути повышения ее эффективности.

Старение

Довольно часто помимо гомогенизации применяют дополнительный метод упрочнения, предусматривающий *низкотемпературный нагрев* литых или закаленных сплавов для образования выделений промежуточных фаз. При этом, практические режимы предусматривают такие количества, геометрию и характер распределения этих фаз, чтобы они обеспечивали максимум упрочнения.

Несмотря на то, что упрочнение во времени при комнатной температуре было обнаружено А. Вильмом еще в 1906 г., до настоящего времени *нет надежного объяснения процессов старения*. Существующая *теория дисперсионного твердения* базируется, в основном, на результатах исследования системы Al-Cu и часто не способна объяснить процессы, протекающие в других сплавах.

Поэтому для развития представлений о старении важны экспериментальные данные о влиянии водорода – естественного спутника металлических материалов. Для Al-сплавов этот вопрос подробно рассмотрен в работах [2, 7], где показана определяющая роль водорода в развитии конечных стадий распада твердого раствора, что обуславливает появление общей закономерности – хрупкости в интервале $200 \dots 300^\circ\text{C}$.

Поскольку водород существенно влияет на рост зерна [1], а образование выделений промежуточных фаз [8] и пористости при кристаллизации определяет результат гомогенизации, то *содержание водорода следует считать связующим звеном между процессами получения и обработки изделия*.

Изменение содержания водорода при обработке шихты [9], расплава [10] и кристаллизации [2], обработке давлением и гомогенизации, способное сильно влиять на старение сплавов, необходимо учитывать при разработке общих

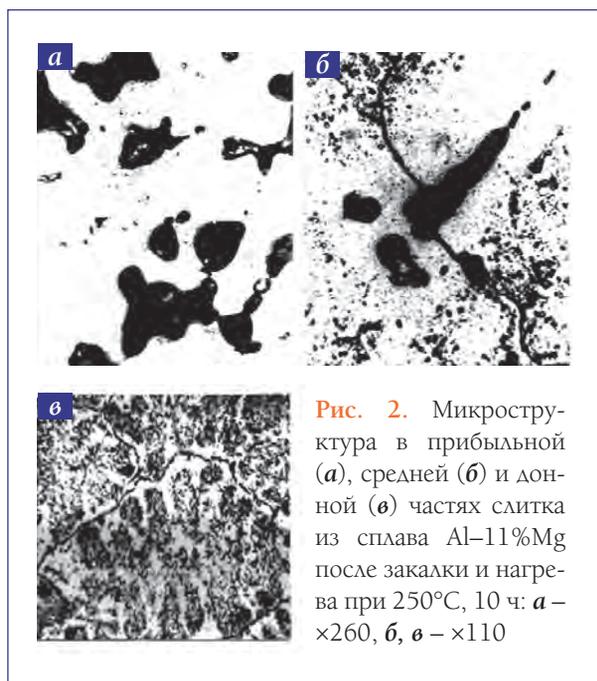


Рис. 2. Микроструктура в прибыльной (а), средней (б) и донной (в) частях слитка из сплава Al–11%Mg после закалки и нагрева при 250°С, 10 ч: а – $\times 260$, б, в – $\times 110$

закономерностей распада пересыщенных твердых растворов.

Содержанием водорода определяется интенсивность распада твердого раствора и соответственное этому упрочнение и разупрочнение сплава. Так, в закаленном по обычному режиму сплаве Al–11%Mg распад по высоте слитка развивается очень неравномерно, несмотря на равномерное распределение Mg.

На рис. 2 видно, что в прибыльной части слитка продукты распада отсутствуют вообще, поскольку водород извлечен из твердого раствора в макропоры. В образцах из средней части слитка, где водород лишь частично молизован, продукты распада не образуются лишь около пор, что рассматривалось в работе [11]. И, наконец, максимальное количество продуктов распада образуется в донной части образца, где определяется наибольшее содержание водорода [2]. Значительные изменения содержания водорода и распада твердого раствора происходят при пластической деформации. Например, холодная деформация значительно сильнее увеличивает содержание водорода, чем горячая.

Так, в литом сплаве Al–2%Cu содержание водорода колеблется от 0,2 до 0,35 см³/100 г. Холодная деформация повышает его до 4,7...7,5, а горячая, предусматривающая нагрев заготовки $\geq 300^\circ\text{C}$, действует намного слабее. В том же сплаве она может довести количество водорода до 0,6...0,32 см³/100 г, а если увеличить время

пробы металла в нагретом состоянии, то горячая деформация может уменьшить содержание водорода до 0,1...0,15 см³/100 г.

С этим связано различие в поведении холодного- и горячедеформированного сплава одной и той же плавки при ТО. Так, для сплавов систем Al–Mg и Al–Cu определена необходимость сокращения времени гомогенизации в 1,1–1,8 раза, при сохранении наибольших механических свойств, за счет применения холодного подката.

В связи с этим сокращается время старения, а также появляется возможность регулирования его температуры, при сохранении или даже некотором повышении прочности.

Приведенные примеры наглядно показывают, что старение сплавов – сложный процесс, который необходимо рассматривать во взаимосвязи с процессами кристаллизации и обработки сплава. При сохранении постоянного содержания ЛЭ разные виды воздействия на жидкий или твердый сплав изменяют количество водорода.

Поскольку имеется уже достаточно сведений о влиянии таких воздействий на гомогенизацию и старение, следует считать, что суть процессов при этих видах ТО определяется количеством, геометрией и характером распределения водорода.

Пережог

Один из наиболее опасных видов нарушения режимов ТО Al-сплавов – пережог. Он развивается при нагреве в область, близкую к неравновесному солидусу, и приводит к нежелательным изменениям свойств.

Немногочисленные исследования пережога Al-сплавов позволяют судить лишь о некоторых особенностях поведения их перед плавлением. Попытки переработать пережог в некоторых сплавах не имели успеха [13].

Ранее И.Ф. Колобневым были сформулированы основные положения пережога, которые предусматривают необходимость завышенного содержания примесей и локальные оплавления по участкам их скопления при неравномерном и быстром подъеме температуры.

Позднее, при подробном рассмотрении пережога сплавов Al–Mg показано, что к числу таких примесей, прежде всего, следует отнести водород [14]. Здесь же приведены данные о структурных изменениях и разрушении, позволяющие считать развитие пережога многостадийным процессом, не развивающимся на ранней стадии

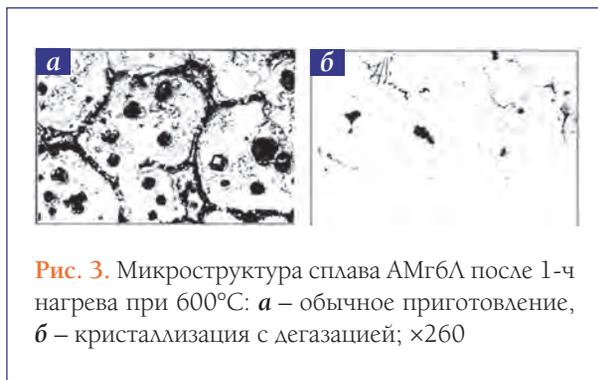


Рис. 3. Микроструктура сплава АМг6Ал после 1-ч нагрева при 600°С: **а** – обычное приготовление, **б** – кристаллизация с дегазацией; $\times 260$

путем образования микро-, а на конечной – макропористости для сплавов, не имеющих плотной защитной пленки. *Образование пористости прямо указывает на ответственность водорода за развитие пережога.*

В сплавах, имеющих в своем составе элементы, которые активно взаимодействуют с кислородом и способствуют уплотнению защитной оксидной пленки (Cu, Si, Be, Cr и др.), часто при пережоге наблюдается распухание образцов. Это обусловлено тем, что пленка сдерживает удаление водорода из металла в атмосферу, а дополнительное его количество, поступающее из разлагающихся при высоком нагреве фаз, приводит к изменению геометрии образца.

Это подтверждается результатами [12], где показано, что рост образцов из сплавов Al–2,5%Si и Al–5%Cu сопровождается уменьшением плотности пор по границам и в объеме зерен. В этой же работе, без рассмотрения участия водорода в пережоге, установлено, что рост образцов усиливается при увеличении содержания Cu, Si, скорости кристаллизации и охлаждения с температурой нагрева. Другими словами, здесь показано, что все факторы, повышающие количество водорода в Al, способствуют развитию пережога и росту образцов.

Для развития представлений о пережоге необходимы экспериментальные исследования, указывающие на первоначальные причины его развития. К числу таких исследований можно отнести определение прямой зависимости между интенсивностью упрочнения сплавов при гомогенизации, а также при старении и пережоге. Уже отмечалось [14], что процессы при пережоге в сплавах на основе Al–Mg развиваются с наследованием литой и гомогенизированной структуры.

Дальнейшими исследованиями определено, что интенсивность старения и развития пережо-

га прямо связаны между собой. Так, в образцах, вырезанных из донной части закаленного сплава (см. рис. 2), пережог развивается при меньших температурах и за более короткое время, чем в образцах из средней и прибыльной частей слитка.

Наиболее полное удаление водорода из шихты и расплава при кристаллизации, обработке давлением и ТО приводят к повышению устойчивости Al-сплавов к пережогу. Например, дегазация сплава АМг6 при кристаллизации, с приложением давления, практически полностью удаляет водород, что устраняет образование продуктов распада даже при нагревах до 200...300°С [2]. В этом же случае температура начала пережога может быть повышена на 80...150°С (рис. 3).

Таким образом, можно считать, что при увеличении содержания водорода сокращается время гомогенизации, повышается упрочнение при закалке, с последующим усилением процессов старения и чувствительности к пережогу. Такая связь между гомогенизацией, старением и пережогом, осуществляемая водородом, дает возможность глубже понять природу процессов при ТО и, в определенной мере, прогнозировать свойства сплавов с сокращением большего числа дорогостоящих испытаний и количества бракуемой продукции.

Выводы

- Водород принимает активное участие в процессах растворения или образования промежуточных фаз, что регулирует упрочнение и разупрочнение Al-сплавов.
- Естественный спутник Al-сплавов – водород определяет скорость диффузионных процессов и регулирует интенсивность гомогенизации, старения, пережога.
- Для дальнейшего повышения эффективности ТО необходима разработка режимов, обеспечивающих возможность управления содержанием водорода на всех стадиях получения и обработки сплавов.

СПИСОК

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Засыпкин В.А., Семенов А.Е. Поведение растворенных газов при кристаллизации алюминиевых сплавов // Сб. «Жаропрочные и высокопрочные алюминиевые сплавы». – М.: Металлургия, 1966. – Вып. 4. – С. 292.

2. **Афанасьев В.К.** Об особенностях влияния водорода на распад алюминиевых твердых растворов // Физика и химия обработки материалов. – 1977. – №4. – С. 67.

3. **Афанасьев В.К., Акулов Е.А., Борисов В.Н.** Металлографическое исследование разрушения литых сплавов на основе системы Al-Mg // РЖ Металлургия. – 1974. – 10И461.

4. **Лютцау В.Г., Белоусов Н.Н., Ровинский Б.М.** О возникновении микропор в сплавах // Физика и химия обработки материалов. – 1971. – №1. – С. 81.

5. **А.с. 538041 СССР.** Способ рафинирования алюминия и его сплавов / В.К. Афанасьев, В.Г. Угрюмов, Я.Д. Вишняков, А.А. Абрамов. – Оpubл. 1976.

6. **Афанасьев В.К.** Об изменении микроструктуры литейных алюминиевых сплавов при длительном хранении отливок // Известия Вузов. Цветная металлургия. – 1971. – №4. – С. 124.

7. **Афанасьев В.К.** Некоторые закономерности изменения пластичности алюминия и его сплавов // Известия АН СССР Металлы. – 1978. – №6. – С. 195.

8. **Афанасьев В.К., Абрамов А.А.** Структура Al-Mg сплавов с титаном и цирконием // Митом. – 1977. – №6. – С. 62.

9. **Афанасьев В.К., Никитин В.И.** Структура и свойства алюминиевых сплавов в зависимости от условий подготовки шихтовых материалов // Литейное производство. – 1976. – №4. – С. 16.

10. **Афанасьев В.К.** Влияние обработки жидкого алюминия на распад твердого раствора в его сплавах // Физика и химия обработки материалов. – 1977. – №4. – С. 159.

11. **Афанасьев В.К.** Металлографическое исследование распада твердого раствора в сплавах алюминия // Митом. – 1976. – №2. – С. 49.

12. **Баранов А.А., Мовчан В.Ф., Чермышева И.И.** Влияние оплавления на рост объема алюминиевых сплавов при термоциклировании // Известия АН СССР. Металлы. – 1974. – №1. – С. 164.

13. **Орышич И.В., Харченко В.Н.** Образование структуры пережога в литейных силуминах АЛ9 и ВАЛ5 // Митом. – 1973. – №8. – С. 54.

14. **Афанасьев В.К., Акулов Е.А., Борисов В.Н., Лаврова Н.Б., Перфилова Л.В.** Изменение структуры и свойств сплавов Al-Mg при пережоге // Митом. – 1976. – №7. – С. 18.

Сведения об авторах

Афанасьев Владимир Константинович – д-р техн. наук, проф., Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк. E-mail: sv_dolgov@mail.ru

Малюх Марина Александровна – мл. науч. сотр., там же.

Попова Марина Владимировна – д-р техн. наук, там же.

Долгова Светлана Владимировна – мл. науч. сотр., там же.

Лаврова Наталья Борисовна – ст. преп., Сибирский федеральный университет, г. Красноярск.

Анонс!

В журнале «Библиотечка литейщика», №1, 2017 г. читайте следующие материалы.

- Подборку статей «К 60-летию ОАО «БЕЛНИИЛИТ».
- Развитие литейной базы для машиностроения («Стратегия развития тяжелого машиностроения на период до 2020 г. и на перспективу до 2030 г.»)