

Научный журнал

ВЕСТНИК

Сибирского
государственного
индустриального
университета

№ 3 (21), 2017

Основан в 2012 году
Выходит 4 раза в год

Учредитель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Редакционная коллегия

М.В. Темлянецв
(главный редактор)
С.В. Коновалов
(отв. секретарь)
П.П. Баранов
Е.П. Волынкина
Г.В. Галевский
В.Ф. Горюшкин
В.Е. Громов
Л.Т. Дворников
Жан-Мари Дрезет
Стефан Золотарефф
Пенг Као
С.М. Кулаков
А.Г. Никитин
Е.Г. Оршанская
Т.В. Петрова
Е.В. Протопопов
В.И. Пантелеев
Арвинд Сингх
А.Ю. Столбоушкин
И.А. Султангузин
А.В. Феоктистов
В.Н. Фрянов
В.П. Цымбал
Си Чжан Чен

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Guoyi Tang, Xiaohui Li, Guolin Song, Gromov V.E. Recent progress of external field processing technology in China.....4
Прудников А.Н., Попова М.В., Прудников В.А. Воздействие деформации на структуру и свойства силуминов.....11
Попова М.В., Прудников А.Н., Долгова С.В., Малюх М.А. Перспективные алюминиевые сплавы для авиационной и космической техники.....18
Уманский А.А., Козырев Н.А., Думова Л.В. Анализ взаимосвязи состава металлошихты электроплавки с основными технико-экономическими показателями выплавки рельсовой стали.....24

ГОРНОЕ ДЕЛО И ГЕОТЕХНОЛОГИИ

- Домрачев А.Н., Риб С.В. Обоснование алгоритма оценки влияния состояния выемочных выработок при моделировании работы длинного очистного забоя.....29

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Ганиев И.Н., Ниёзов Х.Х., Гулов Б.Н., Низомов З., Бердиев А.Э. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамических функций сплава АК1М2, легированного празеодимом и неодимом.....32
Ганиев И.Н., Джайлоев Дж.Х., Амонов И.Т., Эсанов Н.Р. Влияние щелочноземельных металлов на анодное поведение сплава Al + 2,18 % Fe в нейтральной среде.....40

АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

- Благиных Е.А., Стерлигов В.В. Обоснование пространственного развития поселения Теба Междуреченского городского округа кемеровской области.....45

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Шмыглева А.В. Заповедники раннесоветской эпохи: теория и практика.....51
Панова В.Ф., Панов С.А., Карпачева А.А., Прохоренко О.Д. Переработка отходов обогащения железной руды.....56

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Думова Л.В., Уманский А.А. Проблема идентификации заинтересованных сторон российскими компаниями в рамках функционирования концепции устойчивого развития (на примере металлургической отрасли).....63

ОТКЛИКИ, РЕЦЕНЗИИ, БИОГРАФИИ

К 60-летию Евгения Валентиновича Протопопова	70
Громову Виктору Евгеньевичу 70 лет.....	72

Рефераты.....	74
К сведению авторов.....	80

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации:
ПИ № ФС77-52991 от 01.03.2013 г.

Адрес редакции:

654007, Кемеровская обл., г. Ново-
кузнецк, ул. Кирова, 42, Сибирский
государственный
индустриальный университет
каб. 433 М
тел. 8-3843-74-86-28
[http: www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)
e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru

Адрес издателя:

654007, Кемеровская обл., г. Ново-
кузнецк, ул. Кирова, 42, Сибирский
государственный
индустриальный университет
каб. 336 Г
тел. 8-3843-46-35-02
e-mail: rector@sibsiu.ru

Адрес типографии:

654007, Кемеровская обл., г. Ново-
кузнецк, ул. Кирова, 42, Сибирский
государственный
индустриальный университет
каб. 280 Г
тел. 8-3843-46-44-02

Подписные индексы:

Объединенный каталог «Пресса
России» – 41270

Подписано в печать

26.09.2017 г.

Выход в свет

30.09.2017 г.

Формат бумаги 60×88 1/8.

Бумага писчая.

Печать офсетная.

Усл.печ.л. 4,5.

Уч.-изд.л. 4,9.

Тираж 300 экз.

Заказ № 462.

Цена свободная.

УДК 669.782'71.018.046.516.4:536.413.2

*М.В. Попова, А.Н. Прудников, С.В. Долгова, М.А. Малюх***Сибирский государственный индустриальный университет****ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ И КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ***

Авиационная и космическая промышленность является одним из наиболее высокотехнологичных секторов экономики, развитие которого невозможно без разработки новых материалов и внедрения технологий их производства [1]. Для обеспечения конкурентоспособности отечественных изделий необходимо создание и применение материалов, обладающих высокими удельными свойствами и низкой плотностью [2].

Для авиационно-космической техники повышение весовой эффективности изделий является актуальной задачей, которая решается путем применения материалов пониженной плотности, прежде всего, алюминиевых сплавов. К современным сплавам для авиационной и космической техники предъявляют требования не только по механическим характеристикам и плотности, но и по теплофизическим свойствам, в частности, они должны иметь низкий коэффициент линейного расширения (КЛР) [3, 4]. В качестве авиационных материалов чаще всего используют деформируемые алюминиевые сплавы, легированные медью, цинком, магнием, марганцем и литием. Однако деформируемые сплавы на основе системы алюминий – кремний до настоящего времени не получили широкого распространения, несмотря на важные шаги, сделанные в этом направлении [5 – 9].

Сплавы системы Al – Si имеют весьма привлекательный комплекс свойств. Они легки ($\gamma = 2600 \div 2700 \text{ кг/м}^3$), немагнитны, обладают высокой коррозионной стойкостью практически во всех агрессивных средах, высокими твердостью и износостойкостью. Эти сплавы характеризуются хорошими литейными свойствами и герметичностью. Кремний, имеющий малый коэффициент линейного расширения, эффективно снижает КЛР алюминия. Многолетние исследования [10] особенностей теплового расширения сплавов Al – Si позволяют

утверждать, что увеличение содержания кремния и переход к сплавам на основе кремния обеспечивает снижение коэффициента линейного расширения в среднем на 10^{-6} K^{-1} на каждые 5 % кремния в интервале температур испытания 50 – 250 °С. Таким образом, КЛР сплавов Al – Si при увеличении содержания кремния от 10 до 50 % снижается с $22 \cdot 10^{-6}$ до $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [10].

Большим достоинством и интересной особенностью этих сплавов является то, что они не склонны к хладноломкости, более того, в области отрицательных температур КЛР этих сплавов становится ниже, а механические свойства – выше, чем при комнатной температуре (так, например, при –203 °С прочность сплавов примерно на 20 % превышает прочность при 20 °С при сохранении пластичности) [11, 12]. Таким образом, сплавы системы алюминий – кремний могут сохранять свои свойства в широком температурном интервале: от –200 до 100 °С.

Применение сплавов на основе системы Al – Si как конструкционных материалов, а также в качестве сплавов специального назначения во многом определяется параметрами их микроструктуры. Кремний, введенный в расплав уже в количестве 6 – 7 %, склонен к ликвации и образованию первичных выделений кремнистой фазы, как правило, в виде крупных частиц. Поэтому свойства сплавов Al – Si зависят не только от их химического состава, но и от размеров, формы и характера распределения частиц кремнистой фазы. Эффективно управлять структурой, а, следовательно, и свойствами силуминов возможно с позиций «водородного материаловедения», предусматривающего разработку новых материалов и способов их получения, в которых водород играет важную функциональную роль [13 – 17].

Как было показано ранее [18, 19], применение различных способов подготовки шихты, обработки расплава и кристаллизации, увели-

* Работа выполнена под руководством профессора В.К. Афанасьева.

чивающих содержание атомарного водорода, позволяет получить однородную мелкодисперсную структуру заэвтектических силуминов. Это, в свою очередь, повышает их технологическую пластичность, что обеспечивает возможность проведения не только горячей, но и холодной пластической деформации с большой степенью нагартовки.

В соответствии с механизмом теплового расширения, согласно которому существует тесная связь между величиной КЛР и содержанием водорода в силуминах, коллективом авторов под руководством профессора В.К. Афанасьева были разработаны холоднодеформируемые сплавы системы Al – Si с низким КЛР, в состав которых в качестве легирующего элемента входит водород [20].

Разработанная серия деформируемых сплавов на основе алюминия содержит кремний и водород: 15 – 20 % Si; 0,00134 – 0,00259 % H;

остальное алюминий (по массе). Смесь компонентов для каждого сплава, составы которых приведены в табл. 1, плавил в алундовом тигле. Водород в расплав вводили с помощью обработки влажным асбестом с последующим выстаиванием в атмосфере водяных паров. При введении в расплав водород способствует увеличению числа центров кристаллизации и появлению в структуре затвердевших сплавов мелких равномерно распределенных кристаллов первичного кремния. Сплав с минимальным содержанием кремния (Al – 15 % Si) после обработки расплава, увеличивающей количество водорода, приобретает структуру неравновесной эвтектики. Рентгеноструктурный анализ показал, что формирование эвтектики в сплаве Al – 15 % Si приводит к увеличению периода решетки α -твердого раствора с 4,056 до 4,058 Å. Поскольку кремний и основные примеси, присутствующие в алюминии

Т а б л и ц а 1

Химический состав и физико-механические свойства холоднодеформированных сплавов Al – Si

Состав сплава, % (Al – остальное)	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$, в интервале температур испытания, °C			Механические свойства	
	20 – 100	100 – 150	150 – 200	σ_B , МПа	δ , %
15 Si – 0,00259 H	13,6	5,9	4,9	241	2,3
17 Si – 0,00193 H	12,5	6,2	5,7	236	2,3
18 Si – 0,00170 H	11,1	4,6	7,2	212	2,0
20 Si – 0,00134 H	10,6	3,3	5,1	194	1,6

технической чистоты, уменьшают период решетки алюминия, следует сделать вывод, что не происходит пересыщения α -твердого раствора кремнием, а образуется пересыщенный твердый раствор водорода. Кроме того, увеличение массовой доли водорода в сплаве уменьшает устойчивость кремнистой фазы и поэтому позволяет проводить пластическую деформацию без образования надрывов и трещин.

Слитки разработанных сплавов толщиной 15 – 20 мм подвергали прокатке со степенью деформации 90 – 95 %. Разработанные деформируемые сплавы на основе алюминия имеют значения КЛР (табл. 1), сравнимые с КЛР литых высококремнистых силуминов при температурах испытания 20 – 100 °C, и ниже в два – три раза при температурах испытания 100 – 200 °C.

Металлографический анализ показал, что введение водорода в состав сплавов в заданных пределах (0,00134 – 0,00259 %, что составляет 15 – 29 см³/100 г металла) способствует образованию эвтектической структуры

с малым количеством равномерно распределенных первичных кристаллов кремния, в результате чего становится возможной холодная пластическая деформация (рис. 1). Деформированные сплавы имеют еще более тонкодисперсную структуру. Средний размер эвтектических кристаллов составляет 4 – 8 мкм, размеры отдельных первичных кристаллов могут достигать 80 – 100 мкм (рис. 2).

Благодаря тонкодисперсному строению эвтектики и малому количеству первичных кристаллов кремния полиэдрической формы разрушение сплавов носит в основном вязкий характер. Фрактографические исследования проводили путем визуального анализа изломов и использовали растровый электронный микроскоп при увеличениях 1000 – 8000 (рис. 3). При визуальном осмотре излом выглядит как тонкокристаллический, имеющий бархатистое строение, а на микрофрактограммах видно, что участки вязкого разрушения с явно выраженным ямочным рельефом (рис. 3, в, е) чередуются

ются с небольшими участками скола по частицам кремнистой фазы (рис. 3, б, д).

В процессе пластической деформации происходит дополнительное дробление кремнистой фазы (рис. 3, б, д), в результате чего часть водорода из нее переходит в алюминий, образуя в нем пересыщенный твердый раствор внедрения, что, в свою очередь, приводит к снижению коэффициента линейного расширения и повышению механических свойств. Разработанные сплавы отличаются хорошим сочетанием прочностных и пластических свойств: $\sigma_b = 194 \div 241$ МПа, $\delta = 1,8 \div 2,3$ %. Последующая термическая обработка (закалка и старение) приводит к увеличению прочности при некотором уменьшении пластичности (табл. 2).

Разработанные сплавы имеют не только высокие прочностные свойства, но и хорошее сопро-

тивление усталостному разрушению. На рис. 4 представлены кинетические диаграммы усталостного разрушения сплавов Al – (15 – 20) % Si – H. Видно, что на ранних стадиях роста сопротивления распространению усталостной трещины сплавов с разным содержанием кремния различается мало. Пороговый коэффициент интенсивности напряжений ΔK_{th} изменяется от 4,8 МПа·м^{1/2} (сплав Al – 20 % Si) до 5,3 МПа·м^{1/2} (сплав Al – 15 % Si). При переходе от стадии припорогового роста усталостной трещины к стадии стабильного ее распространения при скоростях, превышающих 10⁻⁸ м/цикл, различие в химическом составе сплавов сказывается более существенно. Наиболее высокие характеристики трещиностойкости наблюдали у сплава Al – 15 % Si – H, что объясняется

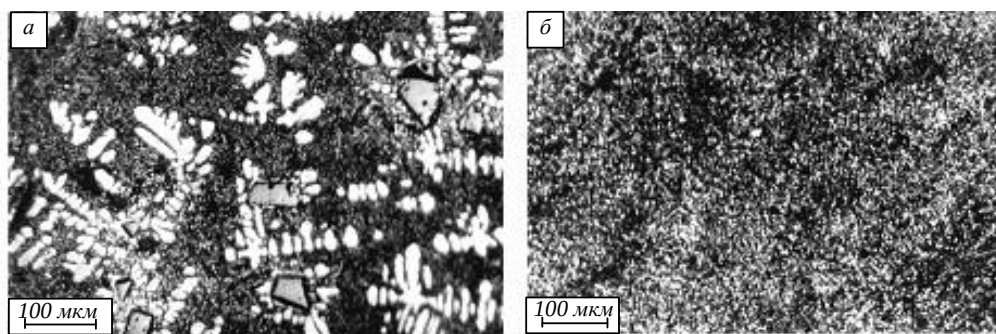


Рис. 1. Микроструктура сплава Al – 15 % Si:
а – обычное приготовление; б – продувка расплава водородом

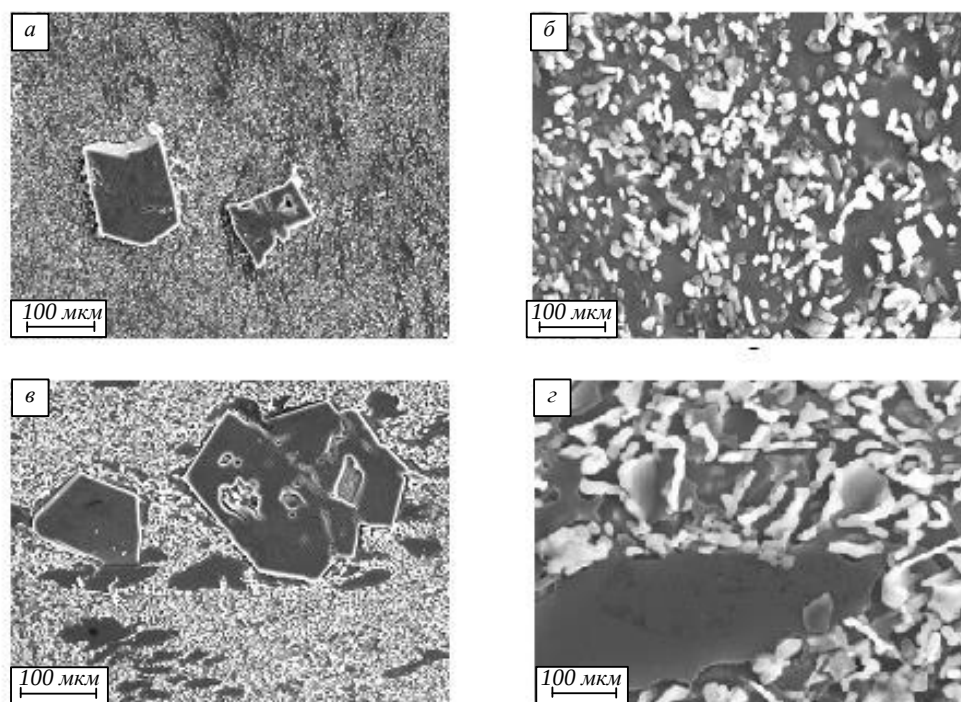


Рис. 2: Микроструктура сплава системы Al – 15 % Si – H (а, б); Al – 20 % Si – H (в, г)

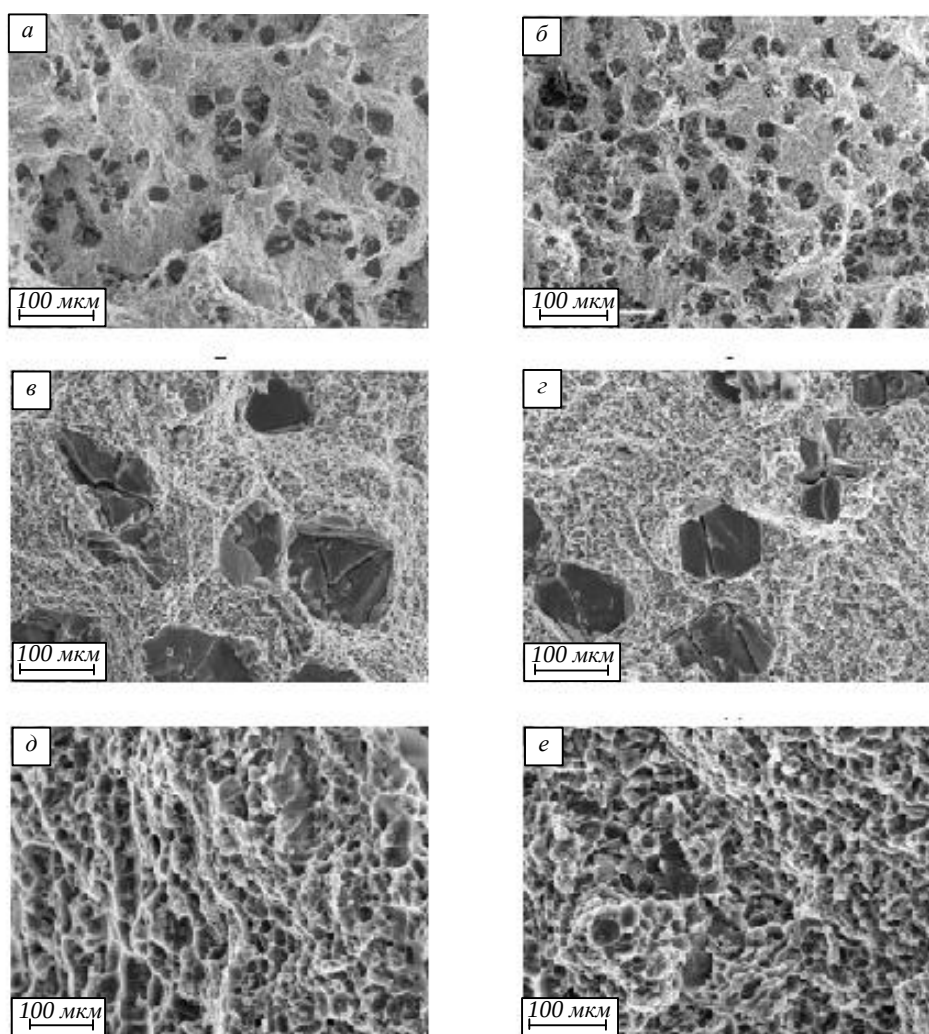


Рис. 3. Микрофрактограммы сплава Al – 15 % Si – H (а, в) и Al – 20 % Si – H (з, е)

Т а б л и ц а 2

**Влияние термической обработки на механические свойства холоднодеформированного сплава
Al – 15 % Si – H**

Режим термической обработки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
—	160	241	2,3	10,5
Закалка с 530°C, в течение 1 ч, вода	165	246	2,0	9,6
Закалка с 530°C, в течение 1 ч, вода + старение 160°C, в течение 10 ч, воздух	169	251	1,5	11,4

лучшей морфологией его структуры. Для дальнейшего повышения прочности и пластичности при сохранении низкого коэффициента линейного расширения в сплавы на основе алюминия, содержащие кремний и водород, дополнительно вводили титан и никель при соотношении компонентов: 15,0 – 20,0 % Si; 0,05 – 0,40 % Ti; 0,40 – 0,80 % Ni; 0,00162 – 0,00270 % H; остальное алюминий (по массе).

Введение титана в состав в количестве 0,05 – 0,40 % (по массе) совместно с водородом (0,00162 – 0,00270 % или 18 – 30 см³/100 г ме-

талла) за счет дополнительного измельчения структурных составляющих повышает технологическую пластичность сплавов и их механические свойства. Никель также повышает прочность сплавов, сохраняя низкий коэффициент линейного расширения. Смесь компонентов для каждого из разработанных составов сплавов, приведенных в табл. 3, плавил в шахтной печи в алундовом тигле. Водород вводили с помощью обработки влажным асбестом. Слитки толщиной 15 – 20 мм подвергали холодной прокатке со степенью деформации 90 – 95 %. Из полу-

ченных заготовок вырезали образцы и изучали свойства сплавов. Результаты испытаний приведены в табл. 3. Как следует из приведенных данных, введение титана и никеля обеспечивает повышение прочности на 11 – 20 %, пластичности – на 30 – 56 % при сохранении значения коэффициента линейного расширения на том же уровне.

Выводы. Приведенные сведения о сплавах с низким коэффициентом линейного расширения наглядно показывают существование реальной возможности получения легких материалов, которые смогут конкурировать по величине КЛР со сплавами на основе железа и титана. Малая плотность деформируемых алюминий-кремниевых сплавов при достаточных механических свойствах обеспечит им широкое применение в различных областях машиностроения и, прежде всего, в авиационно-космической и приборной технике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года. – В кн.: Юбилейный науч.-технич. сб. «Авиационные материалы и технологии» (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). – М.: ВИАМ, 2012. С. 7 – 17.
2. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов. – В кн.: Юбилейный науч.-

технич. сб. «Авиационные материалы и технологии» (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). – М.: ВИАМ, 2012. С. 157 – 167.

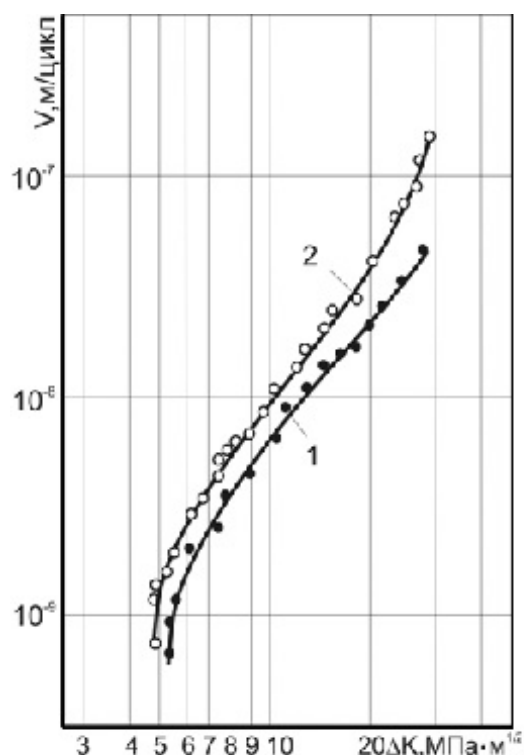


Рис. 4. Кинетические диаграммы усталостного разрушения разработанного сплава Al – (15 ÷ 20 %) Si – H при содержании кремния 15 % (1) и 20 % (2) при $R = 0,1$

Т а б л и ц а 3

Химический состав и физико-механические свойства и коэффициент линейного расширения сплавов Al – Si – H – Ti – Ni

Состав сплавов, % (Al - остальное)	Механические свойства		$\alpha \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$ в интервале температур испытания, °C		
	σ_b , МПа	δ , %	20 – 100	100 – 150	150 – 200
15 ÷ 20 Si – 0,00134 ÷ 0,00259 H	194 – 241	1,6 – 2,3	10,6 – 13,6	3,3 – 5,9	4,9 – 5,1
15 Si – 0,4 Ti – 0,6 Ni – 0,00207 H	275	3,6	13,3	5,9	4,9
18 Si – 0,2 Ti – 0,8 Ni – 0,00162 H	290	3,0	11,6	5,9	4,2
20 Si – 0,05 Ti – 0,4 Ni – 0,00270 H	267	3,2	10,7	4,0	4,3

3. Афанасьев В.К., Попова М.В. Перспективы развития легких сплавов с малым тепловым расширением для космической техники // Металлургия машиностроения. 2012. № 6. С. 8 – 13.
4. Афанасьев В.К., Попова М.В., Самонь В.А. О создании новых легких деформированных сплавов для космической техники // Металлургия машиностроения. 2014. № 5. С. 21 – 28.
5. Эскин Г.И., Артес А.Е., Панов Е.И., Бер Л.Б., Бочвар С.Г., Ялфимов В.И., Гуреева Т.В. Исследование технологии изготовления деформированных полуфабрикатов из заэвтектического силумина 01392 с использованием поперечно-винтовой прокатки // Технология легких сплавов. 2008. № 1. С. 83 – 89.
6. Эскин Г.И., Бочвар С.Г., Ялфимов В.И. Влияние технологии литья и деформации

- на структуру и свойства деформированных полуфабрикатов из заэвтектических силуминов. – В кн.: Материалы Всероссийской научно-технической конференции Новые материалы и технологии «НМТ-2008». Т. 1. – М.: МАТИ, 2008. С. 112, 113.
7. Эскин Г.И., Бочвар С.Г., Ялфимов В.И. Новые тенденции в технологии литья и деформирования заэвтектических силуминов // *Металлургия машиностроения*. 2009. № 4. С. 21 – 24.
8. Афанасьев В.К., Прудников А.Н. Высокопрочный алюминиевый сплав для деталей узлов летательных аппаратов // *Металлургия машиностроения*. 2011. № 5. С. 31 – 34.
9. Афанасьев В.К., Герцен В.В., Коровин Г.Т., Долгова С.В., Попова М.В. Водородная обработка расплава для увеличения деформируемости высококремнистых Al-сплавов // *Металлургия машиностроения*. 2015. № 4. С. 14 – 18.
10. Афанасьев В.К., Горшенин А.В., Попова М.В., Прудников А.Н., Старостина М.А. О влиянии кремния на тепловое расширение алюминия // *Металлургия машиностроения*. 2010. № 6. С. 23 – 26.
11. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. / Пер. с англ. – М.: *Металлургия*, 1979. – 640 с.
12. Кошелев П.Ф., Беляев С.Е. Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах: справочное пособие. – М.: *Машиностроение*, 1967. – 364 с.
13. Колачев Б.А. Водород в металлах и сплавах // *МиТОМ*. 1999. № 3. С. 3 – 11.
14. Шаповалов В.И. Водород как новый легирующий элемент. – В кн.: Водородное материаловедение и химия гидридов металлов. Сборник тезисов VI международной конференции. – Украина, Ялта, 1999. С. 213.
15. Афанасьев В.К. Некоторые итоги и перспективы металлургии // *Литейное производство*. 2000. № 3. С. 3 – 5.
16. Goltsov V.A. Fundamentals of hydrogen treatment of materials. – In book: *Progress in Hydrogen Treatment of Materials*. – Donetsk-Coral Gables: Kassiopeya Ltd, 2001. P. 161 – 184.
17. Афанасьев В.К. Водородная платформа периодической системы элементов. Часть II // *Металлургия машиностроения*. 2012. № 4. С. 3 – 8.
18. Афанасьев В.К., Герцен В.В., Долгова С.В., Мусохранов Ю.М., Попова М.В. О влиянии водяного пара на формирование свойств высококремнистых Al-сплавов // *Металлургия машиностроения*. 2015. № 5. С. 17 – 1.
19. Афанасьев В.К., Горшенин А.В., Долгова С.В., Самонь В.А., Попова М.В. Литье под давлением медистого силумина // *Литейное производство*. 2015. № 6. С. 22 – 26.
20. Афанасьев В.К., Попова М.В., Прудников А.Н., Зезиков М.В., Горшенин А.В. Водород – легирующий элемент алюминиевых сплавов // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2005. № 6. С. 36 – 39.

© 2017 г. М.В. Попова, А.Н. Прудников,
С.В. Долгова, М.А. Малюх
Поступила 30 августа 2017 г.