

УДК 669.715:669.884

Ю.Ю. Клочкова¹, Г.Г. Клочков¹, В.А. Романенко¹, В.И. Попов¹**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛИСТОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА В-1469**

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-3-8

В настоящее время существует проблема изготовления тонких листов из алюминий-литиевых сплавов методом холодной рулонной прокатки ввиду их пониженной технологической пластичности. Перспективный высокопрочный сплав В-1469 разработки ВИАМ системы Al–Cu–Li, дополнительно легированный микродобавками Ag, Sc и Zr, обладает повышенной технологической пластичностью. Разработана промышленная технология рулонной прокатки тонких листов из сплава В-1469. Выбрана температура горячей прокатки, исследовано влияние режимов термомеханической обработки на структуру и механические свойства листов. Приведены результаты всесторонних исследований механических, коррозионных и эксплуатационных свойств листов.

Ключевые слова: сплав В-1469, система Al–Cu–Li, легирование, серебро, скандий, цирконий, рулонная прокатка, термическая обработка, структура, механические свойства, коррозионная стойкость.

An increase in weight efficiency of perspective aircraft is possible using aluminum-lithium alloys with low density. At present there is a problem of manufacturing of thin sheets from aluminum-lithium alloys by cold coil rolling in view of their low technological plasticity. Perspective high-strength alloy V-1469 developed by VIAM based on Al–Cu–Li system and additionally alloyed by Ag, Sc and Zr, possesses the improved technological plasticity. Industrial technology of coil rolling of thin sheets from V-1469 alloy has been developed. Temperature of hot rolling has been chosen. Effect of thermomechanical treatment on structure and mechanical properties of the sheets has been studied. Results of comprehensive investigation of mechanical, corrosion and operational properties are presented.

Keywords: alloy V-1469, Al–Cu–Li system, alloying, silver, scandium, zirconium, coil rolling, heat treatment, structure, mechanical properties, corrosion resistance.

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

Повышение весовой эффективности перспективных изделий авиационно-космической техники возможно благодаря применению алюминий-литиевых сплавов, обладающих пониженной плотностью [1–3]. В последние годы как в России, так и за рубежом разработке перспективных алюминий-литиевых сплавов и технологий изготовления из них полуфабрикатов с целью снижения массы авиационно-космической техники уделяют все больше внимания [4]. На международных конференциях по алюминиевым сплавам ICAA (International Conference on Aluminum Alloys), в частности ICAA12, которая проходила в г. Йокогаме (Япония), большое количество докладов посвящено исследованиям в этой области [5, 6].

Особый научно-практический интерес представляют сплавы системы Al–Cu–Li, которые обладают наилучшим среди алюминий-литиевых сплавов сочетанием удельной прочности и пластичности и находят широкое применение в России и за рубежом [7]. Одним из перспективных конструкционных материалов для авиационно-космической промышленности является высоко-

прочный высокомодульный сплав В-1469 пониженной плотности системы Al–Cu–Li, дополнительно легированный Ag, Sc и Zr, разработанный в ВИАМ [8, 9]. Это первый в России алюминий-литиевый сплав, легированный серебром, который по удельной прочности превосходит все существующие алюминиевые деформируемые сплавы и обладает при этом высокими характеристиками коррозионной стойкости, трещиностойкости и усталостной долговечности [10].

Положительное влияние серебра при старении алюминий-литиевых сплавов было обнаружено еще в 1956 г. Российские и зарубежные исследователи до сих пор проводят исследования в этой области. Установлено, что повышенные характеристики статической прочности обеспечиваются большим количеством дисперсных частиц метастабильных фаз, содержащих серебро и медь [11, 12]. Наличие большого количества дисперсоидных фаз, образованных цирконием и скандием в присутствии серебра, способствует формированию в полуфабрикатах зон с мелкозернистой рекристаллизованной структурой по механизму непрерывной рекристаллизации, подобной полигонизован-

ной, обеспечивая сплаву упрочнение и высокие характеристики вязкости разрушения [13].

Сплав В-1469, термообработанный по режиму Т1, по сравнению со сплавом-аналогом В950.ч./п.ч.-Т2 обладает повышенными прочностью (более чем на 20%), модулем упругости (на 10%), сопротивлением коррозионному растрескиванию (на 10%), сваривается всеми основными видами сварки. Сплав В-1469 имеет зарубежные сплавы-аналоги: 2195 – широко используется для сварных конструкций ракетно-космической техники [14, 15]; 2098 и 2198 – применяются в конструкциях самолетов компании Airbus. Сплав 2198 также применяется в сварных элементах фюзеляжа одноразовой ракеты-носителя Space X Falcon 9 [7].

В настоящее время существует проблема изготовления тонких листов из алюминий-литиевых сплавов холодной рулонной прокаткой ввиду их пониженной технологической пластичности. Листы из алюминий-литиевых сплавов системы Al–Mg–Li изготавливают карточным методом с применением неоднократных промежуточных термических обработок, что увеличивает трудоемкость, снижает производительность и выход годного [16]. Исключением является высокотехнологичный среднепрочный сплав 1441 системы Al–Cu–Mg–Li, который подвергается холодной рулонной прокатке до толщины 0,3 мм [17–20]. Кроме снижения трудоемкости рулонная прокатка обеспечивает получение листов необходимой длины с высоким качеством поверхности. При карточной прокатке максимальная длина листов составляет 4 м.

Высокопрочный сплав В-1469 обладает повышенной технологической пластичностью, в связи с этим возможно изготовление из него различных видов полуфабрикатов [21, 22].

В данной работе представлены результаты исследования структуры и свойств листов толщиной 1–3 мм из сплава В-1469, полученных холодной рулонной прокаткой.

Материалы и методы

Материалом для исследований служили плоские слитки сечением 300×1100 мм и листы толщиной 1,0–3,0 мм из сплава В-1469, изготовленные в условиях промышленного металлургического производства ОАО «КУМЗ».

Микроструктуру листов исследовали на шлифах размером 15×15 мм при помощи металлографического микроскопа Neophot30, оснащенного цифровой камерой фирмы Olympus. Травление шлифов проводили раствором Келлера следующего состава: HF (1 см³)+HCl (1,5 см³)+HNO₃ (2,5 см³)+вода (95 см³) с последующим осветлением в 10–20%-ном водном растворе азотной кислоты.

Методом просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе JEM 200 CX фирмы Jeol при ускоряющем напряжении 120 кВ с приставкой для усиления электронного изображения Et-

langshen ES500W Gatan проведены исследования структуры листов из сплава В-1469.

Исследование зависимости технологической пластичности слитков от температуры деформации с построением диаграммы пластичности проводили на образцах $\varnothing 15 \times 20$ мм. Образцы помещали в контейнер и осаживали в интервале температур 330–470°C со степенями деформации от 35 до 72% на прессе с усилием 25 тс до появления боковых трещин.

Исследования механических свойств при растяжении, усталостных характеристик, коррозионных свойств листов из сплава В-1469-Т1 проведены с использованием современного сертифицированного оборудования в соответствии с действующими стандартами и методиками РФ.

Результаты

В условиях ОАО «КУМЗ» на промышленном плавильно-литейном агрегате массой 8 т с индукционной тигельной печью и электрическим вакуумным миксером проведена плавка сплава В-1469 и отлиты плоские слитки сечением 300×1100 мм. Химический состав сплава соответствует требованиям ОСТ 1 90048. Проведен гомогенизационный отжиг слитков по серийному режиму.

С целью предварительной оценки температурных параметров технологического процесса изготовления листов построена диаграмма технологической пластичности сплава В-1469 при температурах горячей деформации 330–470°C (рис. 1).

На боковой поверхности образцов, деформированных со степенью деформации более 60%, выявлены дефекты в виде пор и мелких трещин, поэтому при горячей деформации допускается разовая степень деформации до 60%. Таким образом, допустимые температуры деформации находятся в интервале от 370 до 460°C.

С целью подавления процессов собирательной рекристаллизации горячую прокатку листов толщиной 7 мм проводили при низких температурах (380–420°C) [23, 24].

Ввиду повышенной технологической пластичности сплава В-1469 холодную рулонную прокатку листов толщиной 1–3 мм проводили, используя схемы обжатий как для высокотехнологичного среднепрочного сплава 1441. Необходимо отметить, что листы толщиной 1 мм получены с применением одного промежуточного отжига по серийному режиму [25].

Для выбора режима упрочняющей термической обработки изучены особенности формирования структуры и механических свойств листов в зависимости от различных режимов ТО.

В листах, закаленных после выдержки при температурах 510–530°C, наблюдается преимущественно нерекристаллизованная структура (рис. 2). Нагрев до температуры 530°C и выдержка 30 мин обеспечивают максимальный уровень прочности при сохранении высокой пластичности (рис. 3).

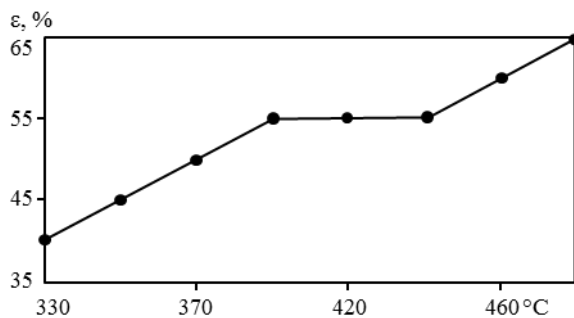


Рис. 1. Технологическая пластичность при осадке образцов из сплава В-1469

а)

б)

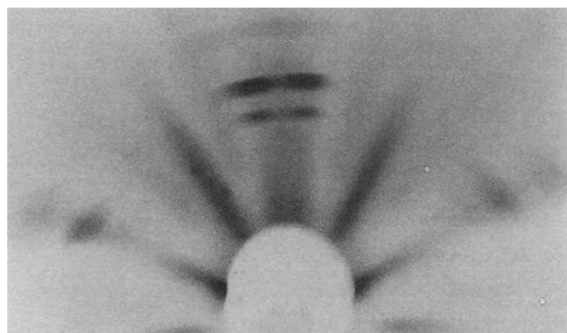
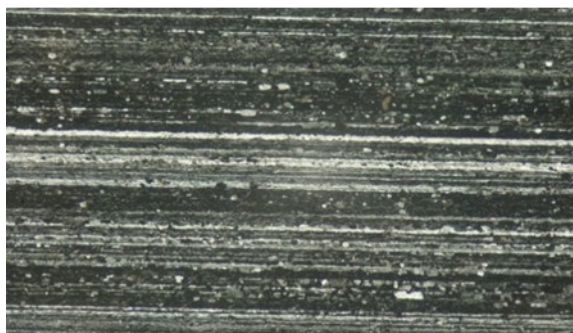
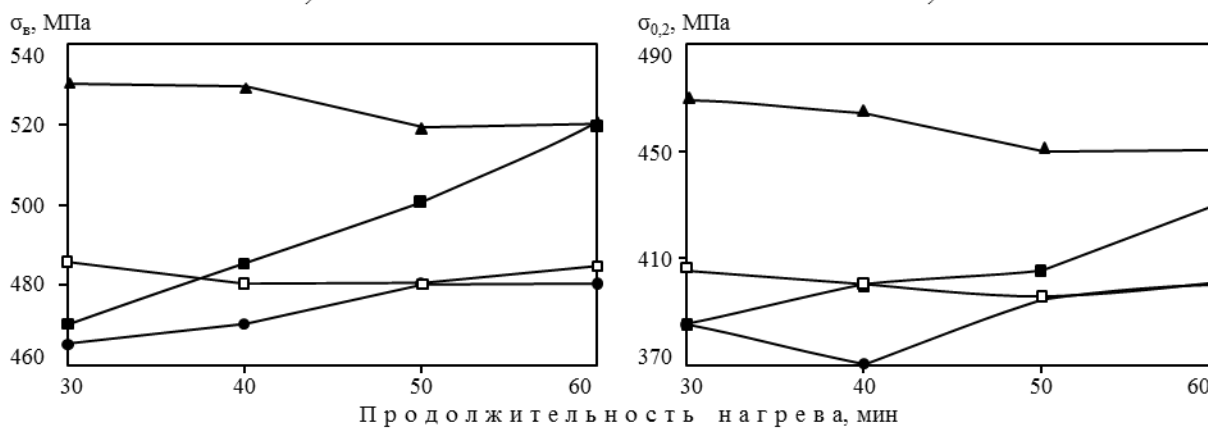


Рис. 2. Микроструктура (а – $\times 200$) и рентгенограмма (б) листов из сплава В-1469

а)

б)



в)

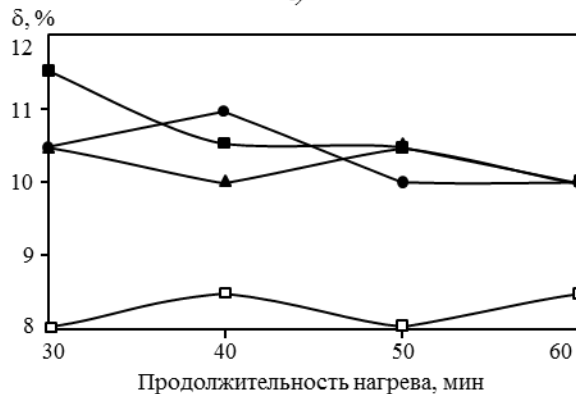


Рис. 3. Зависимость пределов прочности (а) и текучести (б), а также относительного удлинения (в) листов из сплава В-1469 от температуры нагрева под закалку: 510 (●), 520 (■), 530 (▲) и 540°C (□)

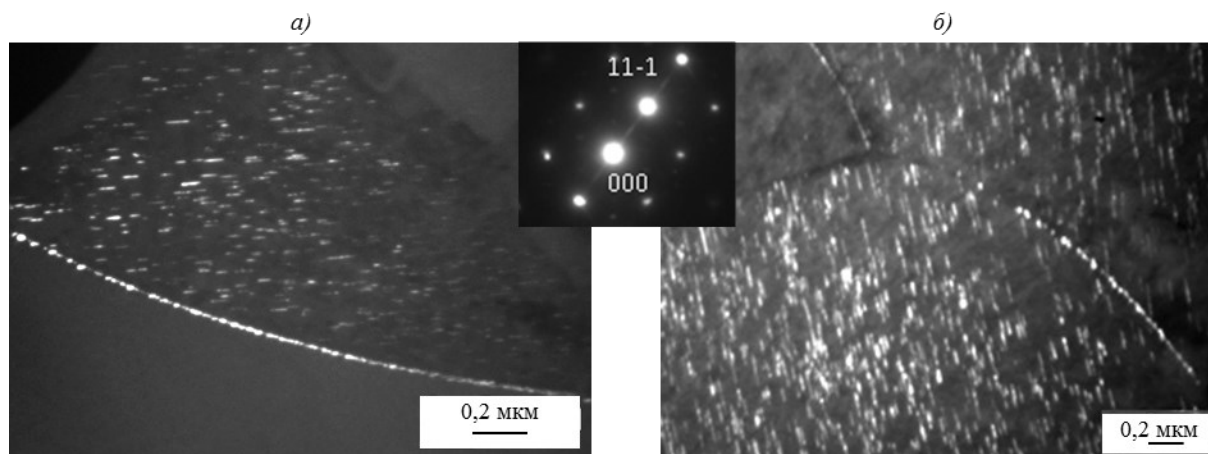


Рис. 4. Темнопольное изображение T_1 -фазы в структуре листов из сплава В-1469, обработанных с помощью правки растяжением (а) и без нее (б)

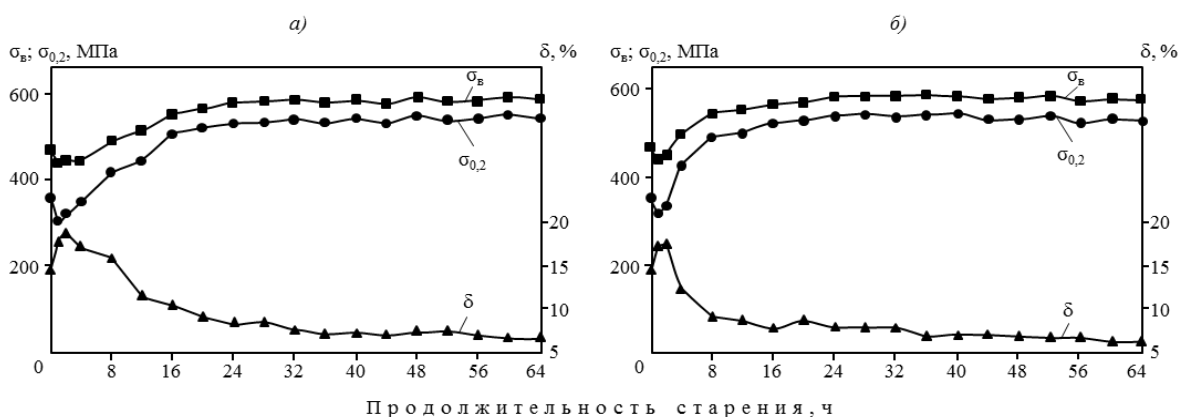


Рис. 5. Кинетические кривые механических свойств при искусственном старении листов из сплава В-1469 при температуре 160 (а) и 170°C (б)

Значительное повышение прочностных свойств, характеристик трещиностойкости и коррозионной стойкости наблюдается при использовании правки растяжением полуфабрикатов из алюминиевых сплавов [26]. В связи с этим после закалки проведена правка растяжением со степенью остаточной деформации 1–3% листов из сплава В-1469, затем искусственное старение, после чего определены их механические свойства при растяжении. Правка растяжением со степенью остаточной деформации 1–3% приводит к повышению пределов прочности (на 40–60 МПа) и текучести (на 70–90 МПа), а также к незначительному снижению относительного удлинения (на 1,0–2,5%). Такое повышение прочности связано с особенностями выделения основной упрочняющей фазы T_1 в структуре сплава В-1469 [27–30]. При электронно-микроскопическом исследовании показано, что применение правки растяжением после закалки приводит к повышению плотности выделений упрочняющей фазы T_1 в результате ее гетерогенного зарождения на дислокациях и малоугловых границах зерен (рис. 4).

Проведены исследования кинетики искус-

ственного старения листов в закаленном состоянии при температурах 160 и 170°C и выдержке до 64 ч (рис. 5).

На графиках кинетических кривых видно, что при температурах 160 и 170°C максимум свойств достигается после выдержки в течение 24 ч, при увеличении которой не происходит разупрочнения (перестаривания) материала, относительное удлинение монотонно снижается по мере увеличения прочности. Более пластичный материал при сохранении высокого уровня механических свойств удастся получить только в недостаренном состоянии.

Установлено также, что после нагрева листов из сплава В-1469 в закаленном и естественно состаренном состоянии при температуре 160–170°C и выдержке 1–2 ч наблюдается явление возврата – снижение предела текучести (на ~20 МПа) и повышение относительного удлинения (на ~5%). Такой нагрев может быть использован для улучшения технологической пластичности материала при изготовлении деталей путем холодной деформации.

В результате проведенных исследований выбран режим термической обработки листов, обеспечивающий максимум прочности ($\sigma_B \geq 580$ МПа,

Сравнительные свойства листов из высокопрочных сплавов

| Свойства | Значения свойств сплава | | Квоты превосходства, % |
|--|----------------------------------|---------------------------|------------------------|
| | В-1469-Т1 (паспортные данные) | В95о.ч./п.ч.-Т2 [31] | |
| d , кг/см ³ | 2,67 | 2,85 | 7 |
| E , ГПа | 78 | 71 | 10 |
| σ_b/d , км (усл. ед.) | $\geq 21,7$ | $\geq 17,5$ | 24 |
| σ_b , МПа | ≥ 580 (по ТУ) | ≥ 500 | 16 |
| $\sigma_{0,2}$, МПа | ≥ 540 (по ТУ) | ≥ 420 | 29 |
| МЦУ: N , кцикл (при $\sigma_{\max}=157$ МПа) | 300 (при частоте 40 Гц) | 155 (при частоте 5 Гц) | – |
| σ_{100}^{150} , МПа | 390 | 215 | 81 |
| $\sigma_{100/0,2}^{150}$, МПа | 290 | 185 | 57 |
| РСК, балл | 3 | <5 | – |
| $\sigma_{кр}$, МПа (II) | 400 | 350 | 14 |

$\sigma_{0,2} \geq 540$ МПа, $\delta \geq 8\%$): закалка после выдержки при температуре 530°C в течение 30 мин+правка растяжением со степенью остаточной деформации 1–3%+искусственное старение при 160°C в течение 24 ч.

Технология рулонной прокатки листов из сплава В-1469 освоена и внедрена в промышленное металлургическое производство ОАО «КУМЗ».

Результаты всесторонних исследований, в том числе при повышенных и криогенных температурах, позволили рекомендовать сплав для конструкций перспективных изделий авиационно-космической техники, работающих в интервале температур от -70 до +150°C (длительно) и от -150 до +175°C (кратковременно).

Листы из сплава В-1469, термообработанные по режиму Т1, рекомендованы для замены аналогичных полуфабрикатов из сплава В95о.ч.-АТ2 и превосходят их по удельной прочности более чем на 20%, модулю упругости – на 10%, сопротивлению коррозионному растрескиванию – на 14% (см. таблицу). Применение сплава В-1469 позволит снизить массу клепаных и сварных деталей и узлов на 10 и 20% соответственно, увеличить ресурс работы изделий.

Листы из сплава В-1469 в отличие от аналогичных полуфабрикатов из сплава В95 свариваются всеми основными способами сварки. Коэффициент разупрочнения сварного соединения составляет 0,7 при аргоно-дуговой сварке; 0,8 – при сварке трением с перемешиванием; 0,8 – при лазерной сварке; 0,65 – при электронно-лучевой сварке.

В настоящее время рассматривается вопрос применения листов (лент) из сплава В-1469 в виде гнутых профилей, изготовленных методом стесненного изгиба, для стрингерного набора верхней части фюзеляжа взамен полуфабрикатов из сплава В95о.ч.-АТ2.

Обсуждение и заключения

Построена диаграмма технологической пластичности сплава В-1469 при повышенных темпе-

ратурах, определен температурный интервал горячей деформации, при котором допускаются разовые степени деформации 50–60%. На серийном оборудовании ОАО «КУМЗ» освоено опытно-промышленное производство методом холодной рулонной прокатки листов из сплава В-1469.

Изучены особенности формирования структуры и механических свойств листов из сплава В-1469 в зависимости от различных режимов упрочняющей термической обработки. Установлено, что применение правки растяжением после закалки приводит к повышению плотности выделений упрочняющей фазы Т₁ в результате ее гетерогенного зарождения на дислокациях и малоугловых границах зерен.

В результате изучения кинетики искусственного старения листов выявлена высокая термическая стабильность основной упрочняющей фазы Т₁, увеличение продолжительности выдержки не приводит к разупрочнению материала.

Выбран режим упрочняющей термической обработки листов, обеспечивающий максимум прочностных характеристик: $\sigma_b \geq 580$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 540$ МПа, $\delta \geq 8\%$.

Высокопрочный сплав В-1469 рекомендован для применения в конструкциях перспективных изделий авиационно-космической техники, работающих в интервале температур от -70 до +150°C (длительно) и от -150 до +175°C (кратковременно).

Листы из сплава В-1469-Т1 рекомендованы для замены аналогичных полуфабрикатов из сплава В95о.ч./п.ч.-Т2 и превосходят их по удельной прочности более чем на 20%, модулю упругости – на 10%, сопротивлению коррозионному растрескиванию – на 14%.

Благодарность

Авторы статьи выражают благодарность специалистам ФГУП «ВИАМ» А.А. Алексееву, Е.А. Лукиной, а также специалисту ОАО «КУМЗ» Б.В. Овсянникову.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Фридляндер И.Н. Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов. М.: Наука. 2005. 275 с.
3. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 5–6.
4. Грушко О.Е., Овсянников Б.В., Овчинников В.В. Алюминиево-литиевые сплавы: металлургия, сварка, металловедение. М.: Наука. 2014. 296 с.
5. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 167–182.
6. Белов Н.А., Антипов В.В., Кайбышев Р.О., Эскин Д.Г. Международная конференция по алюминиевым сплавам ICAA12 //МиТОМ. 2011. №9. С. 3–5.
7. Prasad N.E., Gokhale A., Wanhill R.J.H. Aluminium-lithium alloys: processing, properties, and applications. 2013. 608 p.
8. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него: пат. 2237098 Рос. Федерация; опубл. 24.07.2003.
9. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Алюминийлитиевые сплавы /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный научн.-техн. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 163–171.
10. Клочкова Ю.Ю., Грушко О.Е., Ланцова Л.П., Бурляева И.П., Овсянников Б.В. Освоение в промышленном производстве полуфабрикатов из перспективного алюминийлитиевого сплава В-1469 //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 8–12.
11. Gumbmann E., de Geuser F., Lefebvre W., Sigli C., Deschamps A. The influence of Mg and Ag on the precipitation kinetics and the formation of the T1 phase in Al–Cu–Li alloys /Proceedings of the ICAA14. 2014. P. 945–950.
12. Mukhopadhyay A.K. Compositional characterization of Cu-rich phase particles present in as-cast Al–Cu–Mg–(Li) alloys containing Ag //Metallurgical and materials transactions A. 1999. V. 30. №7. P. 1693–1704.
13. Вайнблат Ю.М. Непрерывная рекристаллизация в горячедеформированных алюминиевых сплавах //Технология легких сплавов. 1995. №5. С. 11–19.
14. Troeger P., Domack M.S., Wagner J.A. Microstructural and Mechanical Property Characterization of Shear Formed Aerospace Aluminum Alloys /NASA. Langly Research Center Hampton. Virginia. 2000.
15. Hales S.J., Hafley R.A. Structure-Property Correlations in Al–Li Alloy Integrally Stiffened Extrusions /NASA, Langly Research Center Hampton. 2001.
16. Скларов Н.М. Путь длиною в 70 лет – от древесины до суперматериалов. М.: МИСиС–ВИАМ. 2002. 488 с.
17. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него: пат. 2278179 Рос. Федерация; опубл. 21.12.2004.
18. Антипов В.В. Технологичный алюминий-литиевый сплав 1441 и слоистые гибридные композиты на его основе //Металлург. 2012. №5. С. 36–39.
19. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г. Слоистые алюмокомпозиты СИАЛ-1441 и сотрудничество с Airbus и TU Delft //Цветные металлы. 2013. №9. С. 50–53.
20. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмокомпозитов на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 174–183.
21. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С., Клочкова Ю.Ю. Высокопрочные сплавы системы Al–Cu–Li с повышенной вязкостью разрушения для самолетных конструкций //Цветные металлы. 2013. №9. С. 66–71.
22. Клочков Г.Г., Грушко О.Е., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Промышленное освоение высокопрочного сплава В-1469 системы Al–Cu–Li–Mg //Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст. 01 (viam-works.ru).
23. Шамрай В.Ф., Грушко О.Е., Эгиз И.В., Боровских С.Н. Кристаллографическая текстура и структура катаных листов из сплава Al–Cu–Li //Металлы. 2006. №2. С. 94–98.
24. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминийлитиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 183–195.
25. Колобнев И.Ф. Термическая обработка алюминиевых сплавов. М.: Металлургиздат. 1961. 413 с.
26. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л., Колобнев Н.И. Алюминиево-литиевые сплавы. Структура и свойства. К.: Наукова думка. 1992. 192 с.
27. Шамрай В.Ф., Клочкова Ю.Ю., Лазарев Э.М., Гордеев А.С., Сиротинкин В.П. Структурные состояния листов из алюминий-литиевого сплава В-1469 //Металлы. 2013. №5. С. 77–84.
28. Лукина Е.А., Алексеев А.А., Антипов В.В., Зайцев Д.В., Клочкова Ю.Ю. Применение диаграмм фазовых превращений при старении для оптимизации режимов старения в Al–Li сплавах В-1469, 1441 //Металлы. 2009. №6. С. 60–67.
29. Алексеев А.А., Лукина Е.А., Клочкова Ю.Ю. Кристаллическая структура сверхтонких пластинчатых выделений //ФММ. 2013. Т. 114. №6. С. 527–533.
30. Истомин-Кастровский В.В., Шамрай В.Ф., Грушко О.Е., Клочкова Ю.Ю., Рязанцева М.А. Влияние добавок серебра, магния, циркония на старение сплава В-1469 системы Al–Cu–Li //Металлы. 2010. №5. С. 73–78.
31. Авиационные материалы: Справочник в 13-ти томах. 7-е изд., перераб. и доп. /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2009. Т. 4. Ч. 1. Кн. 2. 170 с.