

УДК 669.017.165

*М.С. Оглодков<sup>1</sup>, М.В. Григорьев<sup>1</sup>, С.И. Пахомкин<sup>1</sup>, Е.Н. Рябова<sup>1</sup>***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ГОМОГЕНИЗАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРУПНОГАБАРИТНЫХ СЛИТКОВ ИЗ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ В-1481**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-1-1

*Проведено исследование особенностей растворения фаз при двухступенчатой гомогенизации опытно-промышленных слитков из сплава В-1481 на основе системы Al–Cu–Li. Показано, что увеличение выдержки на второй ступени способствует практически полному растворению неравновесной эвтектики. Гомогенизация слитков сплава В-1481 по режиму: первая ступень – при температуре на 70–100°С ниже температуры неравновесного солидуса, высокотемпературная вторая ступень – несколько выше температуры неравновесного солидуса, позволяет добиться наиболее полного растворения выделившихся в процессе кристаллизации фаз, а также повышает технологическую пластичность материала при температуре горячей деформации.*

**Ключевые слова:** структура, свойства, слитки, алюминий-литиевый сплав, гомогенизация, технологическая пластичность, Al–Cu–Li.

*A study was made of the features of phase dissolution in the two-step homogenization of pilot-industrial ingots of В-1481 alloy based on the Al–Cu–Li system. It is shown that an increase in exposure at the second stage contributes to the almost complete dissolution of the nonequilibrium eutectic. Homogenization of ingots of alloy В-1481 according to the regime: the first stage – at a temperature of 70–100°С below the temperature of the nonequilibrium solidus, and the high-temperature second stage is slightly higher than the temperature of the nonequilibrium solidus, it allows achieving the most complete dissolution of phases precipitated during crystallization, Technological plasticity of the material at the temperature of hot deformation.*

**Keywords:** structure, properties, ingots, aluminum-lithium alloy, homogenization, technological plasticity, Al–Cu–Li.

<sup>1</sup>Федеральное 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**

Структура и свойства деформированных полуфабрикатов из алюминиевых, в том числе алюминий-литиевых, сплавов в значительной степени зависят от структуры и качества слитков, получаемых методом непрерывного литья в кристаллизатор скольжения [1–4].

Присутствие лития в сплаве из-за его химической активности требует защиты поверхности расплава при плавке и литье слитков. В связи с этим должны быть разработаны способы защиты сплавов с литием в процессе отливки слитков от потерь лития, насыщения водородом и исключаяющие появление неметаллических включений. В результате многолетних исследований в экспериментальных и промышленных условиях разработан технологический процесс, включающий приготовление алюминий-литиевого сплава в индукционной печи под флюсом из эвтектической смеси хлоридов лития и калия, продувки хлором, вакуумирования и выдержки расплава в атмосфере сухого аргона [5–7].

Комплекс свойств сплавов зависит не только от их химического состава и режимов термической обработки, но и от сформированной структуры в полуфабрикатах, которая во многом наследуется от структуры слитков. В свою очередь структура слитков определяется их химическим составом в допускаемых нормативной документацией пределах содержания легирующих и примесных элементов, условиями приготовления расплава, процессом его кристаллизации и режимом последующей гомогенизации. Эти факторы влияют на состав, морфологию, размеры и распределение фазовых составляющих в микроструктуре алюминиевой матрицы [8–14].

В настоящее время для современных изделий авиационной техники с целью дополнительного снижения массы элементов обшивки планера требуются обшивочные листы большой ширины. Так, зарубежные авиапроизводители (фирмы Airbus и Boeing) для изготовления планера используют листы шириной  $>2$  м, что позволяет сократить количество стыков обшивки фюзеляжа. Получение широких листов из алюминиевых сплавов требует особого подхода и к технологическим режимам получения крупногабаритных слитков.

На протяжении нескольких десятилетий как в России, так и за рубежом активно проводятся исследования, направленные на разработку сплавов системы Al–Cu–Li. Значительный интерес к этим сплавам обусловлен тем, что они обладают наиболее оптимальным среди алюминий-литиевых сплавов сочетанием прочностных и ресурсных характеристик. Вместе с тем сплавы системы Al–Cu–Li имеют повышенную технологичность, что позволяет изготавливать из них все виды полуфабрикатов, которые хорошо деформируются и свариваются всеми видами сварки.

К настоящему времени создан целый класс сплавов системы Al–Cu–Li различного назначения. Начиная с 1960 г. во ФГУП «ВИАМ» были разработаны высоколегированные алюминий-литиевые сплавы с высокими прочностными характеристиками; сплавы с повышенным содержанием лития, обладающие низкой плотностью, а также сплавы с повышенной технологической пластичностью и пониженной склонностью к хрупкому разрушению. В последние годы наблюдается общемировая тенденция по разработке алюминий-литиевых сплавов с повышенными характеристиками вязкости разрушения и трещиностойкости при некотором снижении прочности, обладающих при этом высокой коррозионной стойкостью и удовлетворительной свариваемостью применительно к элементам обшивки и стрингерному набору фюзеляжа, – с целью повышения весовой эффективности изделий.

Анализ полученных данных в области исследования влияния содержания легирующих элементов на структуру и свойства сплавов системы Al–Cu–Li нового поколения показал, что многие сплавы с высокими характеристиками вязкости разрушения содержат небольшие количества редкоземельных элементов (Sc, Zr, In, Ce и др.), которые модифицируют литую структуру и препятствуют протеканию рекристаллизации. Скандий и цирконий, кроме того, улучшают свариваемость сплавов.

Основные легирующие элементы Cu, Li и Mg в процессе старения создают упрочняющие метастабильные фазы. Кроме того, магний оказывает твердорастворное упрочнение.

При разработке алюминий-литиевых сплавов нового поколения уделялось внимание не только концентрации элементов (Cu и Li), но и влиянию соотношения Cu/Li, режимов упрочняющей термической обработки на вид метастабильных фаз, морфологию их выделений и количественное соотношение. В сплавах системы Al–Cu–Li при распаде пересыщенного твердого раствора в широком температурно-временном интервале в зависимости от концентраций Cu и Li и их соотношения могут выделяться следующие основные упрочняющие фазы:  $\delta'$ (Al<sub>3</sub>Li),  $\theta'$ (Al<sub>2</sub>Cu),  $T'_1$ (Al<sub>2</sub>CuLi). Максимальное влияние на уровень прочностных характеристик после старения оказывает  $T'_1$ -фаза – в 2–10 раз больший, чем  $\delta'$ -фаза. Фаза  $\theta'$  обычно образуется одновременно с  $\delta'$ -фазой и ее

объемная доля зависит от соотношения Cu/Li. В некоторых алюминий-литиевых сплавах, содержащих Mg, в упрочнении также участвует и фаза S' (Al<sub>2</sub>CuMg). Фаза S' приводит к такому же эффекту, как и δ'-фаза, но величина упрочнения возрастает с повышением степени пластической деформации перед старением. Для обеспечения высокой вязкости разрушения в зарубежных сплавах системы Al–Cu–Li также рекомендуется придерживаться следующего соотношения: Cu+5/3%Li<5,2.

Введение Ag, In и Sn приводит к заметному ускорению процессов старения. Частицы, обогащенные этими элементами и выделившиеся на ранней стадии старения, выступают как гетерогенные участки образования θ'-фазы, при этом коагуляция фазы происходит намного медленнее. Малые добавки Sn задерживают процесс естественного старения, но ускоряют выделения дисперсной метастабильной фазы θ' при искусственном старении, что приводит к повышению прочностных свойств.

Повышение весовой эффективности изделий авиационной техники может быть достигнуто путем применения алюминий-литиевых сплавов, которые обладают повышенным модулем упругости и пониженной плотностью в сравнении с традиционными алюминиевыми сплавами. Одним из таких материалов является перспективный высокопрочный алюминий-литиевый сплав марки В-1481, который обладает высокими характеристиками трещиностойкости, сравнимыми с характеристиками дюралюминов. Благодаря повышенной технологической пластичности сплава В-1481 возможно изготовление из него различных видов полуфабрикатов, в том числе тонких листов, полученных методом холодной рулонной прокатки, которые могут быть применены для элементов обшивки фюзеляжа.

В связи с этим с целью повышения коррозионной стойкости, обеспечения высокой технологичности при прокатке и улучшения качества поверхности листов из алюминий-литиевого сплава актуальной является задача исследования влияния различных режимов гомогенизации на механические свойства и структуру крупногабаритных слитков из алюминий-литиевого сплава марки В-1481.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8.1. «Высокопрочные свариваемые алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности с повышенной вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [15, 16].

### Материалы и методы

В качестве объекта для исследований использовали темплеты от крупногабаритных плоских слитков из алюминий-литиевого сплава В-1481 размером (толщина×высота×ширина) 30×200×815 мм.

Приготовление расплава проводили на промышленном агрегате в составе индукционной тигельной печи и электрического вакуумного миксера.

Литье слитка производили с использованием флюса в лотке и кристаллизаторе сечением 390×1360 мм. Уровень металла регулировали пневматическим регулятором. Термическую обработку (отжиг и гомогенизацию) проводили в печах с принудительной циркуляцией воздуха.

Макроструктурный анализ слитков проводили в литом состоянии после травления в (5–20)%-ном растворе гидроксида натрия (NaOH) в диапазоне температур от 50 до 60°C с последующим осветлением в 30%-ном растворе азотной кислоты (HNO<sub>3</sub>).

Исследование микроструктуры и состава фаз гомогенизированных образцов осуществляли на полированных шлифах с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM–5900 LV с приставкой электронно-зондового микроанализатора локальностью 1÷2 мкм.

Контроль микроструктуры с определением фактического среднего размера микророзерна проводили на долевых микрошлифах после травления реактивом Келлера и анодного оксидирования в соответствии с ГОСТ 21073.3 и МР07-019.

В соответствии с ММ1.595-36-403–2009 и РТМ1.2.032–83 дифференциально-термический анализ (ДТА) сплава проводили на установке DSC 404 F1 для измерения теплоемкости в следующем порядке. Исходный образец сплава помещали в измерительную ячейку термоанализатора, нагревали до 670–680°C и в процессе нагрева фиксировали термоэдс через промежутки времени, равные 5 с. После достижения температуры 670–680°C образец совместно с измерительной ячейкой извлекали из термоанализатора и охлаждали на воздухе, фиксируя термоэдс с тем же временным шагом. Изучение влияния режимов гомогенизации на характер термограмм и микроструктуру сплава В-1481 проводили на образцах после закалки с температуры гомогенизационного отжига.

### Результаты

Для оценки качества полученного крупногабаритного слитка из алюминий-литиевого сплава В-1481 исследована его макроструктура в литом состоянии. Проведенные исследования показали, что структура по сечению – мелкозернистая однородная (рис. 1). Неметаллических включений типа шлаковых, оксидных плен, пористости, трещин, а также грубых скоплений интерметаллидов – не обнаружено, что свидетельствует о хорошем качестве полученного слитка.

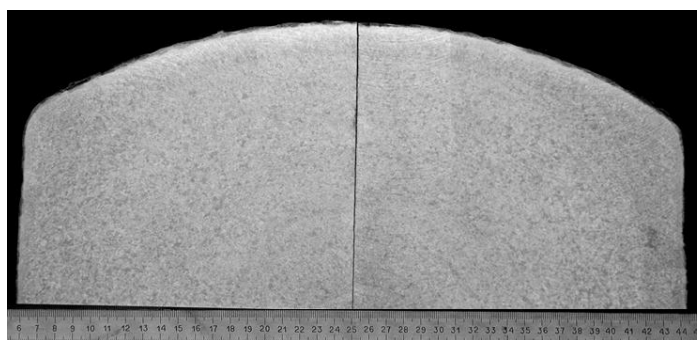


Рис. 1. Макроструктура крупногабаритного слитка из сплава В-1481

В соответствии с ГОСТ Р 50965–96 проведена также оценка слитка на содержание в нем водорода по твердой пробе, которое составило 0,25 см<sup>3</sup>/100 г при допустимой норме для серийных алюминий-литиевых сплавов – не более 0,35 см<sup>3</sup>/100 г.

С целью выбора режима гомогенизации слитка из алюминий-литиевого сплава В-1481 проведено исследование температурных интервалов фазовых превращений методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Дифференциально-термический анализ (ДТА) образца слитка в литом состоянии показал, что температуры плавления эвтектических составляющих и неравновесного солидуса составляют ~504 и 561°C соответственно (рис. 2).

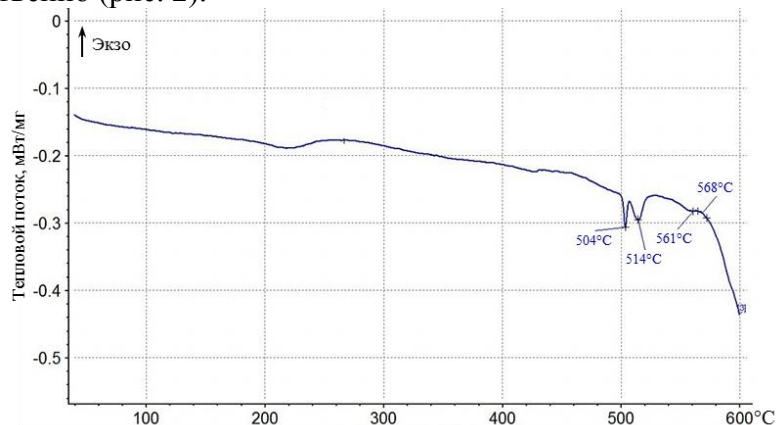


Рис. 2. Термограмма нагрева слитка в литом состоянии из сплава В-1481

Исходя из имеющегося опыта и литературных данных, для обеспечения максимальной как химической, так и структурной однородности полученных слитков, исследованы двухступенчатые режимы гомогенизационных отжигов, при которых температура первой ступени несколько ниже температуры неравновесного солидуса ( $T_1$ ), а второй ступени – максимально приближена к температуре неравновесного солидуса ( $T_2$ ).

С учетом результатов исследований температур фазовых превращений методом ДСК, выбраны следующие три режима гомогенизационного отжига:

- первый режим –  $T_1$ , 8 ч +  $T_2$ , 10 ч;
- второй режим –  $T_1$ , 8 ч +  $T_2$ , 20 ч;
- третий режим –  $T_1$ , 8 ч +  $T_2$ , 30 ч.

Охлаждение слитков осуществляется с печью (со скоростью  $\sim 30^\circ\text{C}/\text{ч}$ ) до  $260^\circ\text{C}$ , далее – на воздухе.

Изучена микроструктура полученных слитков (рис. 3) сплава В-1481 в литом состоянии и после гомогенизационного отжига по выбранным режимам. Установлено, что структура слитков дендритная, по границам дендритных ячеек  $\alpha$ -твердого раствора наблюдаются прослойки эвтектических фаз литейного происхождения, количество которых с увеличением времени выдержки при отжиге уменьшается. Методом микро-рентгеноспектрального анализа выявлено содержание фаз  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ ,  $T_1(\text{Al}_2\text{CuLi})$ , типичных для сплавов системы  $\text{Al}-\text{Cu}-\text{Li}$  (рис. 4, табл. 1).

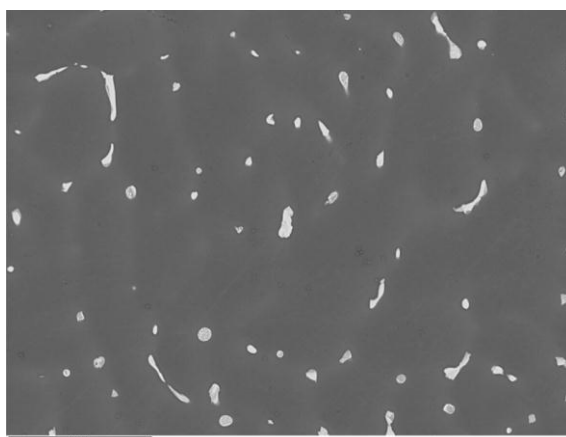


Рис. 3. Микроструктура сплава В-1481 в литом состоянии

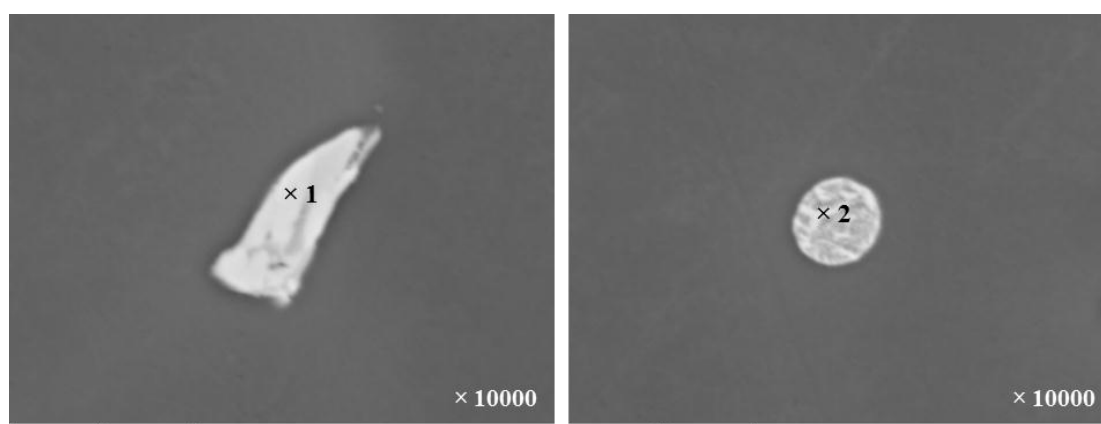


Рис. 4. Интерметаллидные включения в микроструктуре крупногабаритного слитка из сплава В-1481 (литое состояние)

Таблица 1

Место измерения (см. рис. 4)	Содержание элементов, % (по массе)							
	Mg	Al	Sc	Fe	Cu	Zn	Ag	Σ
Средний состав*	0,4	95,4	Н/о**	0,1	3,7	0,3	0,1	100,0
1	1,1	41,8	0,4	3,8	52,2	Н/о	0,5	99,8
2	3,1	49,6	Н/о	1,0	44,5	Н/о	1,7	99,9

\* Локальный анализ с усреднением по площади 500 мкм<sup>2</sup>.

\*\* Н/о – не определяли.

Для оценки эффективности длительности выдержек на второй ступени гомогенизационного отжига проведена оценка изменения объемной доли избыточных эвтектических фаз слитков из сплава В-1481 (табл. 2). Установлено, что увеличение времени выдержки на второй ступени способствует наиболее полному растворению включений литейного происхождения. В дальнейшем это положительно скажется на технологической пластичности слитков из сплава В-1481 при температурах горячей деформации и на уровне прочностных характеристик готового полуфабриката после искусственного старения.

Таблица 2

**Объемная доля включений в слитках из сплава В-1481  
после различных режимов гомогенизации**

Условный номер режима	Режим отжига	Объемная доля фаз, %
Без гомогенизации		4,8
1	T1, 8 ч+T2, 10 ч	2,5
2	T1, 8 ч+T2, 20 ч	1,81
3	T1, 8 ч+T2, 30 ч	1,75

Микроструктурный анализ слитков в центральных и периферийных слоях после различных режимов гомогенизационного отжига показал, что зёрнистая структура однородна по сечению и характеризуется средним размером зерна 400–500 мкм вне зависимости от выбранного режима (рис. 5 и 6).

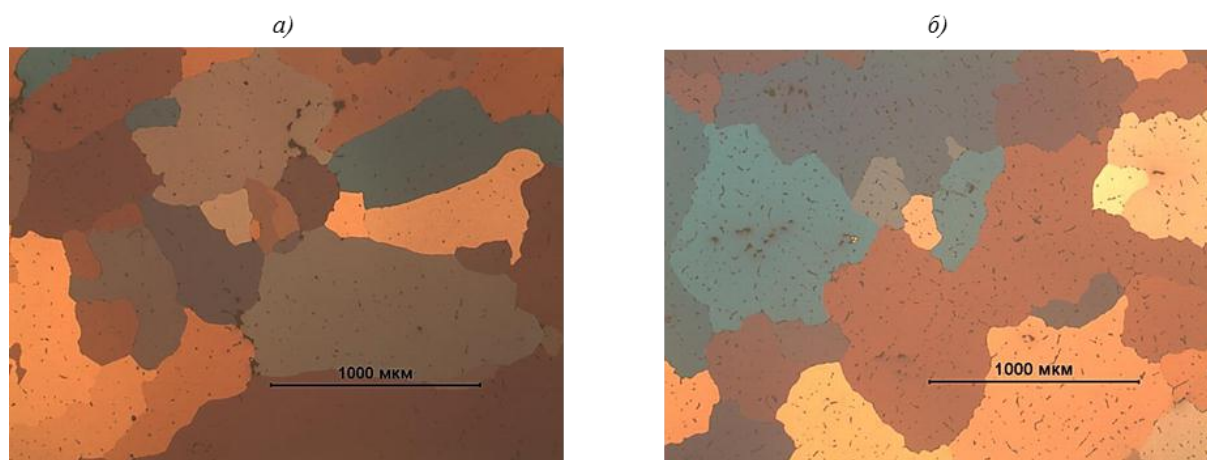


Рис 5. Типичная микроструктура крупногабаритного слитка из сплава В-1481:  
а – периферийные слои; б – центральные слои

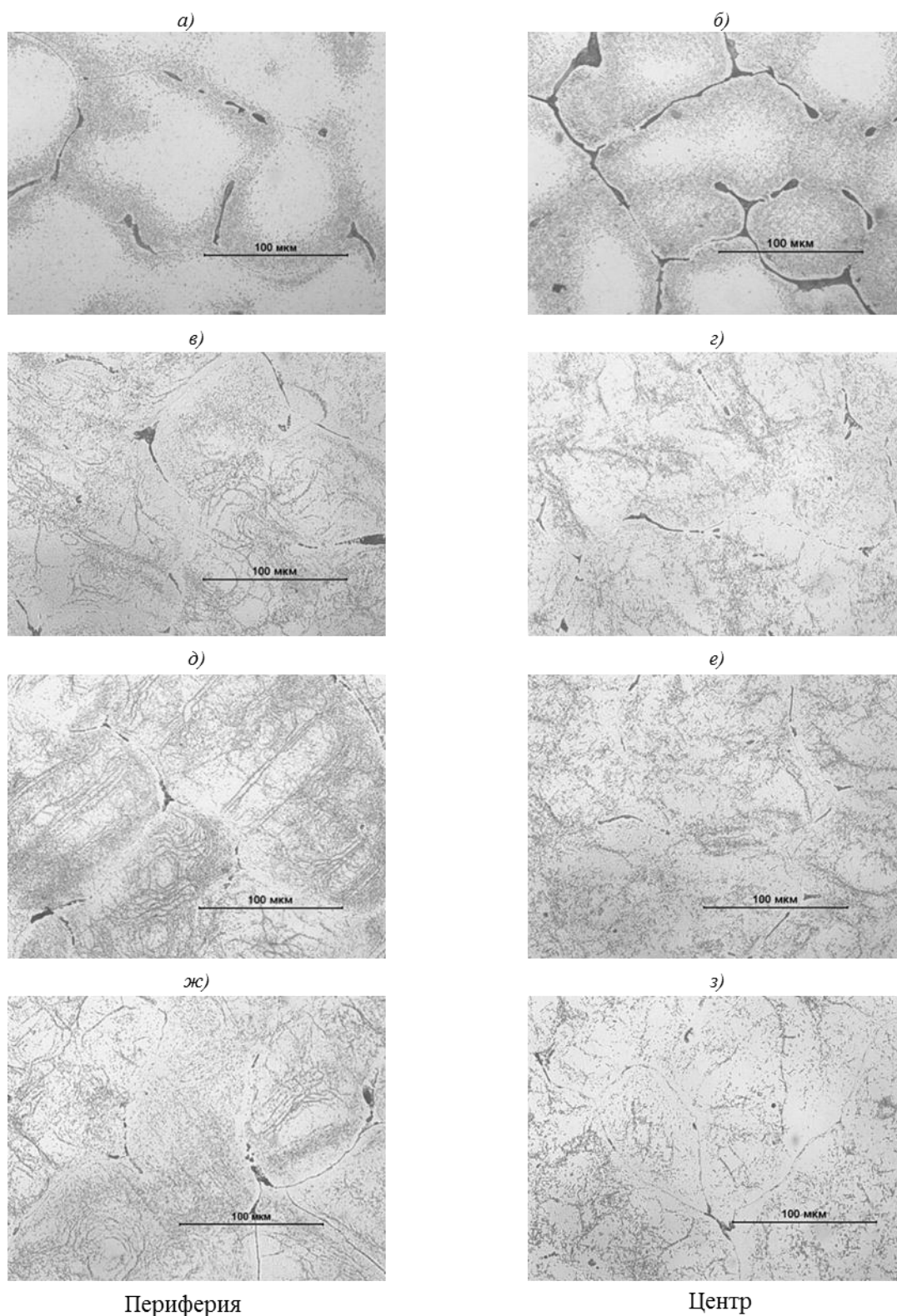


Рис. 6. Микроструктура центральных и периферийных зон слитка из сплава В-1481 в литом состоянии (*а, б*) и после режимов гомогенизации (см. табл. 2) 1 (*в, г*); 2 (*д, е*) и 3 (*ж, з*)

Анализ полученных зависимостей механических свойств слитков из сплава В-1481 после различных режимов гомогенизационного отжига от температуры испытания позволил установить, что увеличение времени выдержки на второй ступени

гомогенизации не оказало существенного влияния на прочностные характеристики (пределы прочности при растяжении и текучести), однако при этом повысилось относительное удлинение и относительное сужение (рис. 7). Полученные данные позволяют увеличить степень обжатия слитка при горячей прокатке и снизить трудоемкость изготовления горячекатаных полуфабрикатов (листов и плит).

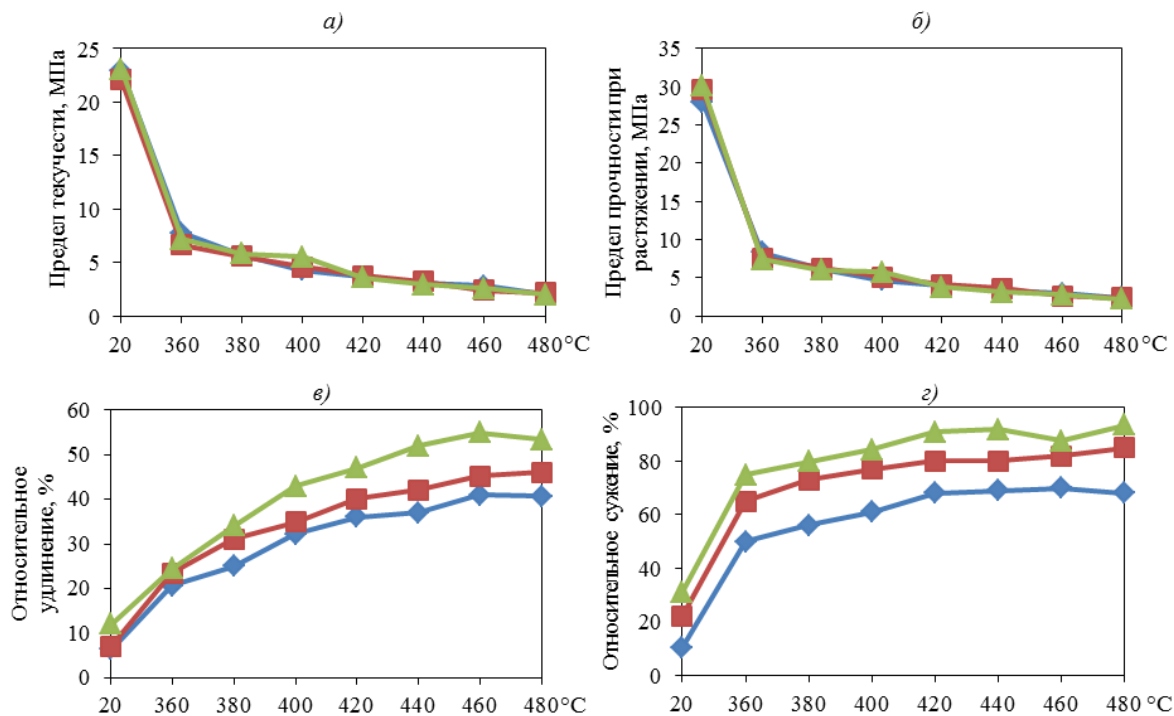


Рис. 7. Механические свойства слитков в зависимости от температуры испытания после режимов гомогенизации (см. табл. 2) 1 (◆), 2 (■) и 3 (▲)

Проведенные исследования подтвердили целесообразность применения ступенчатого режима гомогенизации в слитках из сплава В-1481. При этом возможно совместить операции отжига для снятия внутренних напряжений с первой степенью гомогенизации, если последнюю степень проводить сразу после литья слитка.

Установлено, что крупногабаритные слитки из алюминий-литиевого сплава В-1481 обладают хорошей технологической пластичностью в температурном интервале от 380 до 460 °C. Полученные результаты могут быть использованы для выбора и отработки температурных и деформационных режимов прокатки.

### Обсуждение и заключения

Впервые в условиях металлургического производства изготовлен и исследован крупногабаритный слиток сечением 390×1360 мм из алюминий-литиевого сплава марки В-1481 на основе системы Al–Cu–Li.

Методом ДСК анализа установлено, что температура начала плавления неравновесной эвтектики в негомогенизированном слитке из сплава В-1481 равна ~517 °C.

Показана эффективность использования двухступенчатого режима гомогенизации слитков из сплава В-1481 по режиму: первая степень – при температуре на 70–100 °C ниже температуры неравновесного солидуса, высокотемпературная вторая степень – несколько выше температуры неравновесного солидуса.

Установлено, что температурно-деформационные режимы прокатки полученных крупногабаритных слитков из перспективного алюминий-литиевого сплава В-1481 находятся интервале температур от 380 до 460°С.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 3–10.
3. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // Цветные металлы. 2016. №8 (884). С. 86–91.
4. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л., Колобнев Н.И. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства. Киев: Наукова думка, 1992. 192 с.
5. Фридляндер И.Н., Колобнев Н.И., Сандлер В.С. Алюминий-литиевые сплавы // Машиностроение: энциклопедия. М.: Машиностроение, 2001. Т. II-3. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. С. 156–184.
6. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 167–182.
7. Приемопередающее устройство: пат. 2463364 Рос. Федерация; заявл. 03.05.11; опубл. 10.10.12, Бюл. №28.
8. Овсянников Б.В., Комаров С.Б. Развитие производства деформированных полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов в ОАО «КУМЗ» // Технология легких сплавов. 2014. №1. С. 97–103.
9. Овсянников Б.В., Замятин В.М., Мушников В.С., Оглодков М.С. Термический и микрорентгеноспектральный анализ слитков сплава В-1461 на основе системы Al–Cu–Li // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. №6 (708). С. 12–17.
10. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Антипов В.В. Перспективные алюминий-литиевые сплавы для самолетных конструкций // Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 35–38.
11. Рябова Е.Н., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С. Особенности структуры и свойств листов из сплавов системы Al–Cu–Li–Mg // Металлургия машиностроения. 2015. №1. С. 17–19.
12. Оглодков М.С., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Алексеев А.А., Лукина Е.А. Влияние термомеханической обработки на свойства и структуру сплава системы Al–Cu–Mg–Li–Zn // Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 7–11.
13. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминий-литиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 183–195.
14. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Оглодков М.С., Михайлов Е.Д. Алюминий-литиевые сплавы для самолетостроения // Металлург. 2012. №5. С. 31–35.
15. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
16. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.