

УДК 699.715:621.785.784

А.А. Селиванов<sup>1</sup>, К.В. Антипов<sup>1</sup>, А.И. Асташкин<sup>1</sup>, Б.В. Овсянников<sup>2</sup>**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ИСКУССТВЕННОГО СТАРЕНИЯ  
КОВАННЫХ И КАТАНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ  
ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК4-1ч.**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-9-19

*Приводятся результаты исследований кинетики искусственного старения, полученные в производственных условиях ведущих металлургических заводов, поковок толщиной 135 и 225 мм и плит толщиной 12–60 мм из жаропрочного алюминиевого сплава АК4-1ч. на основе системы Al–Cu–Mg с добавками железа, никеля и кремния.*

*Получены данные по влиянию режимов старения на механические и коррозионные свойства поковок и плит, которые позволяют выбрать оптимальные режимы термической обработки для серийных полуфабрикатов из сплава АК4-1ч., актуализированные для современного модернизированного технологического оборудования металлургических заводов.*

**Ключевые слова:** *алюминиевые деформируемые сплавы, жаропрочные деформируемые сплавы системы Al–Cu–Mg, поковки, катаные плиты, кинетика старения, механические свойства, вязкость разрушения, сопротивление усталости.*

А.А. Selivanov<sup>1</sup>, К.В. Antipov<sup>1</sup>, А.И. Astashkin<sup>1</sup>, В.В. Ovsyannikov<sup>2</sup>**OPTIMIZATION OF ARTIFICIAL AGING  
OF FORGED AND ROLLED SEMI-FINISHED PRODUCTS  
FROM HEAT-RESISTANT ALUMINUM ALLOY AK4-1h.**

*The paper presents the results of studies of the kinetics of artificial aging of forgings of 135 and 225 mm in thickness and plates 12–60 mm thick from the heat-resistant aluminum alloy AK4-1h., based on the Al–Cu–Mg system with iron additives, nickel and silicon. Data on the effect of aging regimes on the mechanical and corrosion properties of forgings and plates have been obtained, which allow choosing optimal heat treatment regimes for serial semi-finished products from AK4-1h. alloy, updated for modern modernized technological equipment of metallurgical plants.*

**Keywords:** *aluminum deformable alloys, heat-resistant deformable alloys of the Al–Cu–Mg system, forgings, rolled plates, aging kinetics, mechanical properties, fracture toughness, fatigue resistance.*

<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

<sup>2</sup>Открытое акционерное общество «Каменск-Уральский металлургический завод» [Open Joint Stock Company «Kamensk-Uralsky Metallurgical Works»]; e-mail: any@kumw.ru

**Введение**

Ведущие российские металлургические заводы, изготавливающие полуфабрикаты (поковки, штамповки, катаные плиты, пресованные профили, листы и др.) из алюминиевых сплавов, провели и проводят в настоящее время обновление и модернизацию основного оборудования (литейного и пресового) для термической и механической обработки полуфабрикатов. С целью получения высококачественных изделий из алюминиевых сплавов применяют современные методы рафинирования металла от

неметаллических и газовых включений, к которым относятся обработка расплава рафинирующими газами, фильтрация через пенокерамические фильтры. Прессы, прокатные станы, плавильные печи и термические агрегаты оснащены электронным оборудованием, позволяющим с большой точностью задавать технологические режимы изготовления на каждом этапе производства полуфабрикатов, а также увеличить степень автоматизации технологических процессов.

Освоение на металлургических заводах нового и модернизированного оборудования, обеспечивающего улучшение структуры и свойств полуфабрикатов, а следовательно, улучшение их качества, требует уточнения и разработки новых технологических режимов изготовления полуфабрикатов – в частности, требуется актуализация режимов термической обработки для серийного жаропрочного сплава АК4-1ч.

Особенность жаропрочных алюминиевых деформируемых сплавов – способность работать длительное время при повышенных температурах и эксплуатационных нагрузках без существенной остаточной деформации и разрушения [1–5]. Сплав АК4-1ч. обладает оптимальным комплексом механических, коррозионных и технологических свойств, а также ресурсных характеристик и применяется в авиационной промышленности как основной конструкционный материал в виде листов, плит, поковок и штамповок, а также прессованных профилей для сверхзвуковой авиации.

Сплав АК4-1ч. близок по своему химическому и фазовому составу к сплавам системы Al–Cu–Mg. Основными упрочняющими фазами при термической обработке служат фазы  $S(Al_2CuMg)$  и  $\theta(CuAl_2)$ . В качестве легирующих элементов в жаропрочном сплаве АК4-1ч. в значительных количествах содержатся: железо, никель и кремний. Этот жаропрочный сплав характеризуется высокими технологическими свойствами при литье, деформации (ковке, штамповке, прессовании, прокатке) и закалке. Одновременный ввод железа и никеля резко повышает прочностные свойства в закаленном и состаренном состояниях. Железо и никель образуют тройное соединение  $FeNiAl_9$ , в котором железо и никель находятся приблизительно в равных весовых соотношениях. Эта фаза улучшает механические свойства при повышенных температурах и жаропрочность сплава, препятствуя пластической деформации при повышенных температурах [6–9].

Представлены результаты исследования влияния режимов искусственного старения на механические и коррозионные свойства кованных и катаных полуфабрикатов из жаропрочного алюминиевого сплава АК4-1ч., широко применяемого в настоящее время для изготовления деталей силового набора и обшивки фюзеляжа современных самолетов, в том числе сверхзвуковых [10–14].

### **Материалы и методы**

Для проведения исследований выбраны поковки в широком диапазоне габаритов: масса полуфабрикатов составляла от 72 до 1385 кг, толщина изменялась от 135 (поковка 1) до 225 мм (поковка 2), толщина плит находилась в интервале 12–60 мм.

Поковки и плиты изготавливали из гомогенизированных цилиндрических и плоских слитков соответственно.

Литье и гомогенизацию слитков проводили в соответствии с технологическими инструкциями для сплавов системы Al–Cu–Mg, действующими в производственных условиях металлургических заводов. Химический состав слитков соответствовал марочному составу сплава АК4-1ч. по ОСТ1 90048–90.

Изготовление поковок проводили на вертикальных прессах с усилием от 1250 до 75000 тс. Закалку поковок осуществляли в условиях металлургических заводов по серийным режимам.

Горячую прокатку плит проводили поперечно-продольным методом на четырехвалковом реверсивном стане горячей прокатки «Кварто-2840» фирмы UNITED.

Нагрев плит под закалку по стандартному режиму проводили на современном горизонтальном закалочном агрегате EBNER, который позволяет регулировать интенсивность и однородность охлаждения путем струйного охлаждения катаных полуфабрикатов. Продолжительность выдержки увеличили в 1,5 раза по сравнению с действующей производственной инструкцией. Правку плит растяжением в свежезакаленном состоянии осуществляли с остаточной деформацией 1,5–3%.

Исследование кинетики старения с целью выбора режимов старения для термической обработки полуфабрикатов проводили на полуфабрикатах, изготовленных на нескольких металлургических заводах из различных слитков, а также при различных условиях и температурах деформации.

Образцы для определения комплекса механических и коррозионных свойств промышленных катаных и кованных полуфабрикатов отбирали с учетом направления волокна из центральных и периферийных зон по толщине, ширине и длине полуфабриката. Искусственное старение проводили в условиях ФГУП «ВИАМ».

Проведено также исследование влияния продолжительности выдержки поковок при нагреве под закалку на их механические и коррозионные свойства.

Определение механических и коррозионных свойств плит и поковок из сплава АК4-1ч. проводили в соответствии с действующими стандартами и методиками РФ [15].

### Результаты и обсуждение

Кинетику старения изучали на образцах, вырезанных из поковок и плит сплава АК4-1ч. Старение проводили в интервале температур 180–215°C и при продолжительности выдержки от 8 до 22 ч – для поковок и от 5 до 22 ч – для плит.

#### *Поковки*

Результаты исследования кинетики старения поковок из сплава АК4-1ч. представлены на рис. 1 и 2.

Анализ кривых старения показывает, что механические свойства поковок из сплава АК4-1ч. во всем исследованном интервале выдержек при двух температурах старения соответствуют требованиям ОСТ 90073–85.

Следует отметить следующие закономерности в изменении механических свойств в процессе старения поковок: при увеличении продолжительности выдержки с 10 до 15 ч в интервале температур 200–215°C предел текучести поковок повышается на 30–40 МПа, а относительное удлинение снижается при практически неизменном уровне предела прочности при растяжении. Увеличение продолжительности выдержки до 20 ч не приводит к заметному изменению механических свойств поковок, но при дальнейшем увеличении времени старения до 22 ч уровень прочностных свойств снижается при незначительном снижении также и относительного удлинения (рис. 1).

Старение в интервале температур 180–195°C (рис. 2) приводит к некоторому повышению (на 20–30 МПа) прочностных свойств при увеличении продолжительности выдержки с 8 до 18 ч при незначительном снижении пластичности. Отмечается заметная (~30 МПа) анизотропия механических характеристик при выдержке 10 ч (особенно проявляющаяся у крупногабаритной поковки 2 толщиной 225 мм – рис. 2, б), обусловленная различной скоростью процессов старения в зависимости от направления волокна в полуфабрикате, причем максимум прочностных свойств у продольных образцов достигается при более коротких выдержках, чем у поперечных и высотных. При продолжительности старения 14 ч анизотропия прочностных характеристик практически отсутствует.

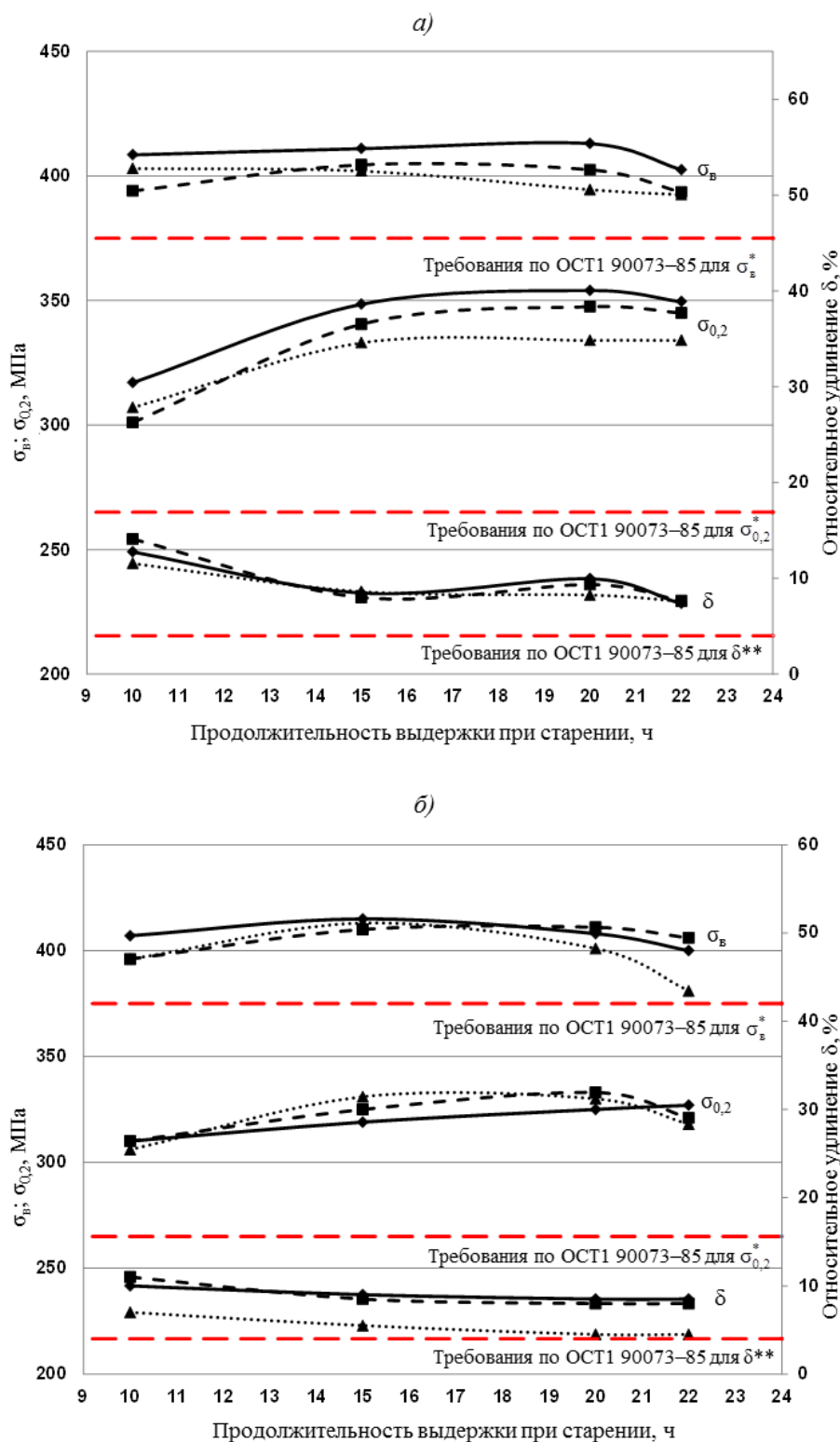


Рис. 1. Изменение механических свойств поковок 1 (а) и 2 (б) из сплава АК4-1ч. в процессе искусственного старения в интервале температур 200–215°С для образцов в продольном (◆), поперечном (■) и высотном (▲) направлениях (\*, \*\* – значения показателей в продольном и высотном направлениях соответственно)

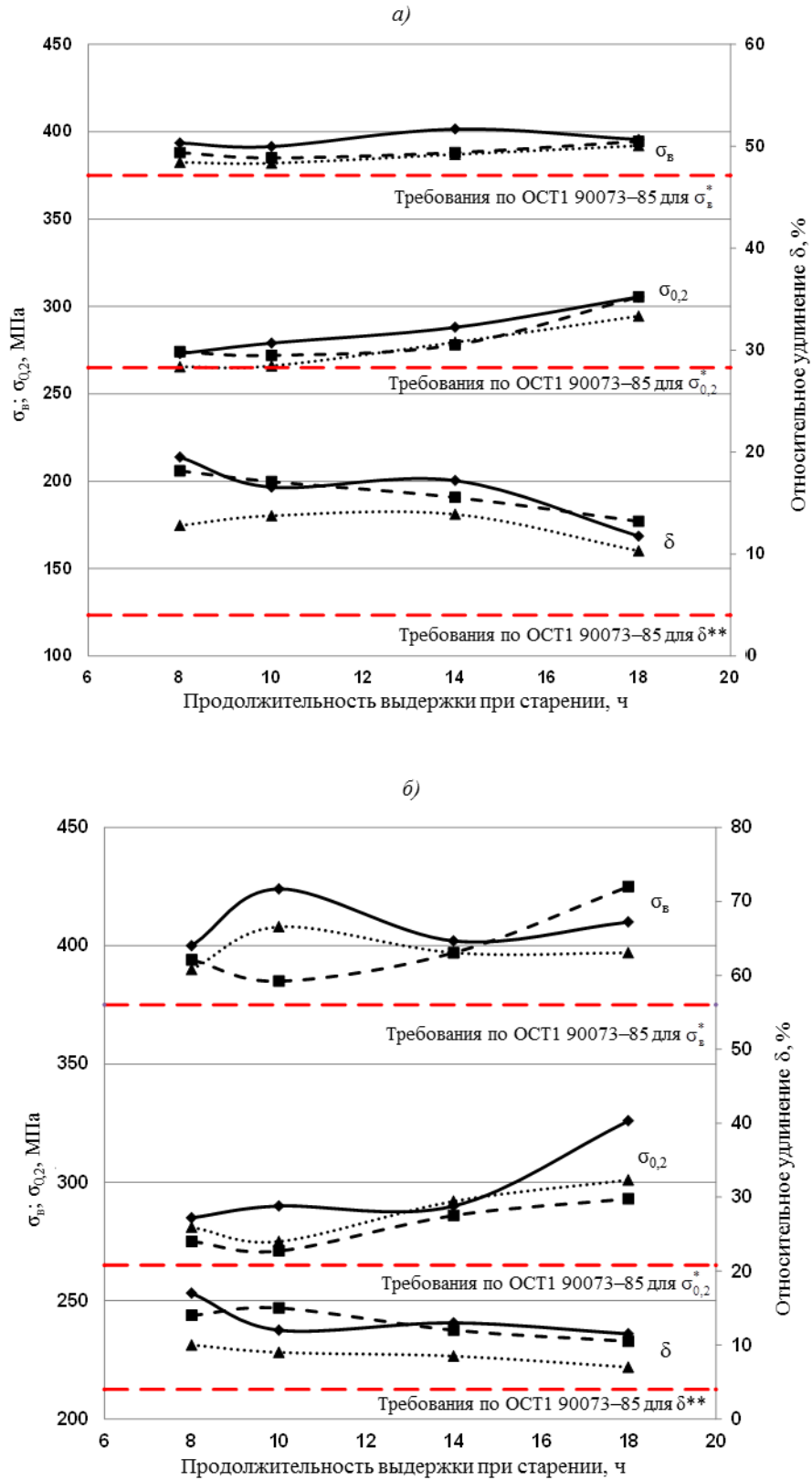


Рис. 2. Изменение механических свойств поковок 1 (а) и 2 (б) из сплава АК4-1с. в процессе искусственного старения в интервале температур 180–195°С для образцов в продольном (◆), поперечном (■) и высотном (▲) направлениях (\*, \*\* – значения показателей в продольном и высотном направлениях соответственно)

Сравнение механических свойств поковок из сплава АК4-1ч., состаренных в интервалах температур 180–195 и 200–215°C, показывает, что предел прочности при растяжении ( $\sigma_b$ ) поковок находится практически на одинаковом уровне (390–415 МПа), а предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) у поковок, состаренных в интервале температур 200–215°C, выше на ~30 МПа по сравнению с поковками после старения в интервале температур 180–195°C, при этом по относительному удлинению преимущество имеют поковки, состаренные в интервале температур 180–195°C ( $\delta=6–12\%$  против  $\delta=4–8\%$  у поковок, состаренных в интервале температур 200–215°C).

Поскольку в производственных условиях (особенно на самолетостроительных заводах при использовании предварительной механической обработки полуфабрикатов) по техническим причинам может возникнуть задержка в проведении старения непосредственно после закалки, изучено влияние продолжительности перерыва между закалкой и старением на механические свойства поковок.

Термическую обработку (закалку и искусственное старение) заготовок под образцы выполняли в условиях ФГУП «ВИАМ» по серийным режимам.

Проведенное исследование показало (табл. 1), что механические свойства поковок из сплава АК4-1ч. не изменяются при длительности перерыва между закалкой и старением до 240 ч. Увеличение этого перерыва до 1–2 мес приводит к снижению относительного удлинения, не оказывая влияния на уровень прочностных характеристик.

Таблица 1

**Влияние перерыва между закалкой и искусственным старением на механические свойства поковок из сплава АК4-1ч.**

| Продолжительность перерыва, ч | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % |
|-------------------------------|------------------|----------------------|--------------|
| 2                             | 390              | 275                  | 19,0         |
| 10                            | 395              | 275                  | 17,0         |
| 24                            | 395              | 265                  | 19,0         |
| 48                            | 400              | 270                  | 19,0         |
| 240                           | 400              | 285                  | 18,5         |
| 1 мес                         | 395              | 285                  | 9,5          |
| 2 мес                         | 395              | 290                  | 10,0         |

#### Плиты

Результаты исследования кинетики старения плит из сплава АК4-1ч. представлены на рис. 3. Кривые старения приведены только для плиты толщиной 60 мм, поскольку для плит толщиной 12–30 мм они имеют аналогичный характер. Анализ кривых старения показывает, что механические свойства плит из сплава АК4-1ч. не во всем исследованном интервале выдержек при двух температурах старения соответствуют требованиям ОСТ1 90117–83.

Следует отметить следующие закономерности в изменении механических свойств в процессе старения плит: при увеличении продолжительности выдержки с 5 до 18 ч при температуре 200°C пределы прочности при растяжении и текучести снижаются на 10–30 МПа, а также снижается относительное удлинение, особенно в высотном направлении.

Старение плит в интервале температур 180–195°C также приводит к снижению прочностных свойств на 20–30 МПа при увеличении продолжительности выдержки с 5 до 18 ч при незначительном снижении пластичности ( $\delta$ ) в продольном направлении и существенном снижении (до 3%, что ниже уровня, требуемого по ОСТ1 90117–83) в высотном направлении при выдержке 14–18 ч.

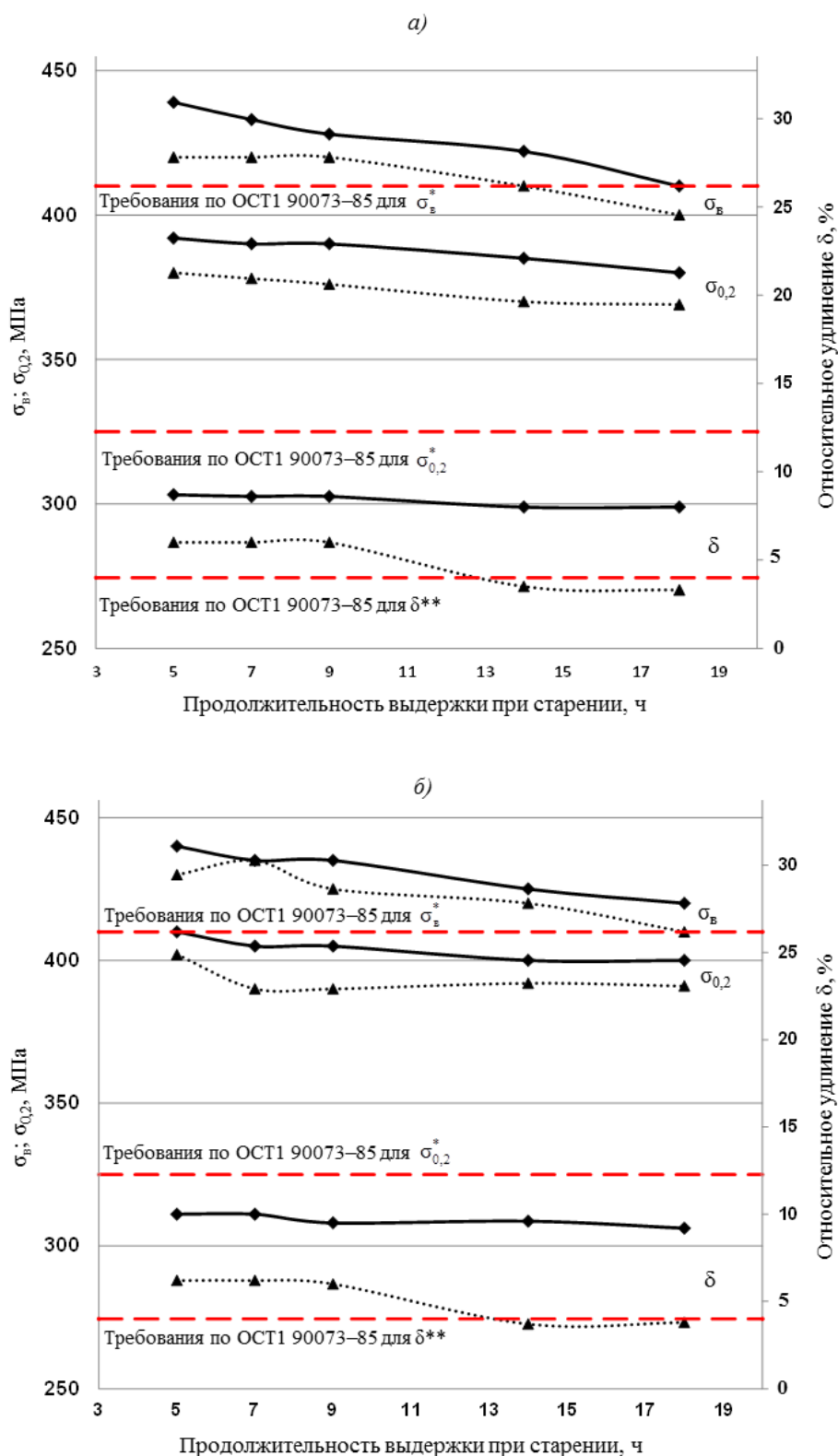


Рис. 3. Изменение механических свойств плит толщиной 60 мм из сплава АК4-1ч. в процессе искусственного старения в интервалах температур 180–195°C (а) и 200–215°C (б) для образцов в продольном (◆) и высотном (▲) направлениях (\*, \*\* – значения показателей в продольном и высотном направлениях соответственно)

Полученные данные по влиянию режимов старения на свойства плит позволяют выбрать оптимальные режимы термической обработки для серийных полуфабрикатов из сплава АК4-1ч., актуализированные для современного модернизированного технологического оборудования металлургических заводов.

Из данных по кривым старения (рис. 1–3) следует, что скорость старения плит несколько выше, чем у поковок, что объясняется различиями в структуре, обусловленными технологией изготовления исследованных полуфабрикатов. В частности, для снятия остаточных закалочных напряжений и устранения коробления в свежезакаленном состоянии проводят правку плит растяжением со степенью остаточной деформации 1–3%. На скорость старения также, вероятно, оказал влияние размер зерна – более крупный у поковок. Микроструктура поковок и плит показана на рис. 4.

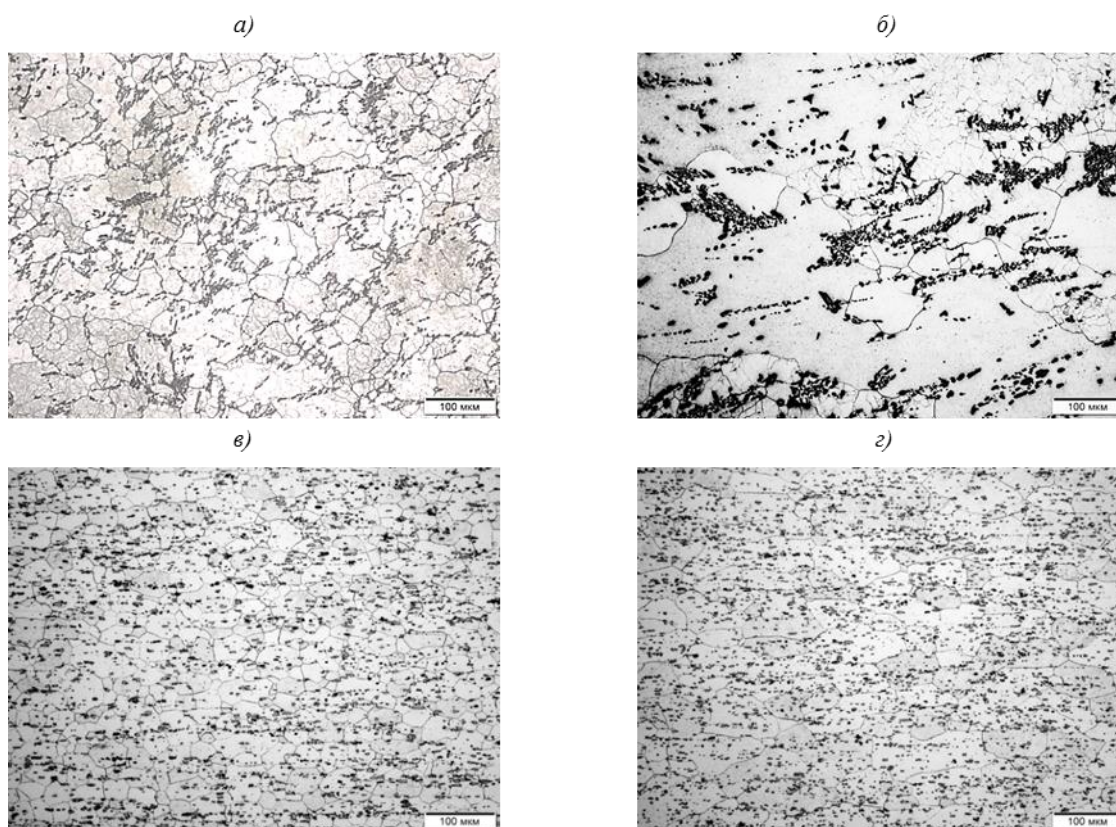


Рис. 4. Типичная микроструктура поковок 1 (а) и 2 (б) и плит толщиной 12 (в) и 60 мм (г) из сплава АК4-1ч.-Т1

Для поковок характерна достаточно однородная рекристаллизованная микроструктура. Размер зерна составляет 80–120 мкм. Зерно в поковке 2 толщиной 225 мм несколько крупнее, чем в поковке 1 толщиной 135 мм.

Плиты толщиной 12, 30 и 60 мм из сплава АК4-1ч. в состоянии Т1 имеют достаточно однородную, мелкозернистую, преимущественно рекристаллизованную микроструктуру со средним размером зерна от 29 до 41 мкм.

#### *Вязкость разрушения ( $K_{1c}$ )*

Исходя из результатов исследования влияния режимов старения на механические свойства поковок и плит из сплава АК4-1ч., выбраны несколько режимов старения,

обеспечивающие максимальный и минимальный уровень их прочностных свойств, – для дальнейшего определения характеристики вязкости разрушения  $K_{Ic}$  (коэффициент интенсивности напряжений). Результаты испытаний образцов в направлении ДП приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Вязкость разрушения поковок и плит из сплава АК4-1ч. после различных режимов старения (средние значения)**

| Вид полуфабриката (толщина, мм) | Условный номер режима | Режим старения, °С (время, ч) | $K_{Ic}$ , МПа $\sqrt{м}$ |
|---------------------------------|-----------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Поковка 1 (135)                 | 1                     | 180–195 (10–16)               | 33                        |
|                                 | 2                     | 200–215 (16–22)               | 30                        |
| Поковка 2 (225)                 | 1                     | 180–195 (10–16)               | 32                        |
|                                 | 2                     | 200–215 (16–22)               | 28                        |
| Плита (12–60)                   | 3                     | 180–195 (14–20)               | 22                        |
|                                 | 4                     | 200–215 (14–20)               | 23                        |
|                                 | 5                     | 180–195 (5–10)                | 30                        |
|                                 | 6                     | 200–215 (7–11)                | 23                        |

Из данных табл. 2 следует, что по уровню значений  $K_{Ic}$  преимущество (более чем на 10%) имеют поковки, состаренные по режиму 1 по сравнению с режимом 2. Для плит наилучшую вязкость разрушения обеспечивает режим старения 5 (преимущество достигает более 20%) по сравнению с режимами старения 3, 4 и 6.

*Коррозионные свойства*

Испытания на склонность к расслаивающей коррозии (РСК) образцов, отобранных из поковок и плит из сплава АК4-1ч. (табл. 3), показали, что наиболее высокую склонность к расслаивающей коррозии (РСК), достигающую до 4–6 балла (особенно после старения в интервале температур 200–215 °С), показали поковки 1. У поковок 2 склонность к РСК ниже (3–4 балл), особенно после старения в интервале температур 180–195°С. Из рассматриваемых в исследовании полуфабрикатов плиты имеют самую низкую склонность к РСК: 1–2 балл.

У поковок 2 толщиной 225 мм из сплава АК4-1ч. склонность к межкристаллитной коррозии (МКК) несколько больше (0,18–0,27 мм), чем у поковок толщиной 135 мм (0,09–0,15 мм); такая же склонность к МКК получена при испытаниях плит толщиной 12–60 мм.

Таблица 3

**Результаты испытаний на склонность к расслаивающей (РСК) и межкристаллитной (МКК) коррозии катаных и кованных полуфабрикатов из сплава АК4-1ч.**

| Вид полуфабриката (толщина, мм) | Режим старения, °С (время, ч) | РСК, балл | МКК, мм   |
|---------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|
| Поковка 1 (135)                 | 180–195 (6–16)                | 2–4       | 0,06–0,15 |
|                                 | 200–215 (8–22)                | 4–6       | 0,09–0,15 |
| Поковка 2 (225)                 | 180–195 (6–16)                | 3–4       | 0,18–0,27 |
|                                 | 200–215 (8–22)                | 3–4       | 0,18–0,24 |
| Плита (12–60)                   | 200–210 (5–11)                | 1–2       | 0,06–0,15 |

### Заключения

Анализ кинетических кривых при искусственном старении поковок и плит показал, что скорость процессов старения у плит выше, чем у поковок, что объясняется различиями в структуре, обусловленными технологией изготовления (в частности, для плит применяется правка растяжением с остаточной деформацией 1,5–3%). Этим объясняется различие в выбранных режимах старения. При термической обработке плит применяются режимы старения с меньшей выдержкой по сравнению с выдержками для поковок.

По уровню значений  $K_{1c}$  преимущество (более чем на 10%) имеют поковки, состаренные по режиму при 180–195°C в течение 10–16 ч по сравнению с режимом при температуре 200–215°C и выдержке 16–22 ч. Для плит наилучшую вязкость разрушения обеспечивает режим старения при 180–195°C в течение 5–10 ч (преимущество достигает более 20%) по сравнению с режимом старения при температуре 200–215°C и выдержке 14–20 ч.

Поковки из сплава АК4-1ч. после старения при 180–195°C и выдержке 10–16 ч характеризуются меньшей склонностью к РСК по сравнению с поковками, состаренными при температуре 200–215°C в течение 16–22 ч. Установлено влияние на склонность к МКК толщины поковок – независимо от режима старения у массивных поковок склонность к МКК выше.

Получено, что плиты из сплава АК4-1ч. толщиной 12–60 мм имеют незначительную склонность к РСК и МКК, которая практически не зависит от исследованных режимов старения.

На основании полученных данных разработаны новые и уточнены действующие режимы искусственного старения поковок и плит из сплава АК4-1ч., актуализированные для современного модернизированного технологического оборудования металлургических заводов. Соответствующие изменения внесены в нормативную документацию по изготовлению полуфабрикатов на металлургических заводах.

### 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. ВИАМ: продолжение пути // Наука в России. 2012. №11. С. 16–21.
3. 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.
4. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 186–194.
5. Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 195–211.
6. Колобнев И.Ф. Жаропрочность литейных алюминиевых сплавов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1973. 320 с.
7. Фридляндер И.Н., Добромислов А.В., Ткаченко Е.А., Сенаторова О.Г. Перспективные высокопрочные материалы на алюминиевой основе // Металловедение и термическая обработка металлов. 2005. №7. С. 17–23.
8. Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. и др. Промышленные алюминиевые сплавы. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1984. 528 с.

9. Фридляндер И.Н., Антипов В.В., Колобнев Н.И., Якимова Е.Г. Конструкционные жаропрочные алюминиевые сплавы // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбил. науч.-техн. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 172–180.
10. Колобнев Н.И. Жаропрочность алюминиевых деформируемых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2016. №1. С. 32–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-32-36.
11. Авиационные материалы: справочник в 13 т. 7-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2008. Т. 4: Алюминиевые и бериллиевые сплавы. Кн. 1: Деформируемые алюминиевые сплавы. 263 с.
12. Телешов В.В., Березин Л.Г., Осокин Л.С. и др. Микроструктура слитка сплава АК4-1ч и ее наследственное влияние на структуру катаной плиты // Цветные металлы и сплавы. 1997. №11–12. С. 93–98.
13. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 167–182.
14. Телешов В.В. Развитие конструкционных деформируемых алюминиевых сплавов систем Al–Cu и Al–Cu–Mg для длительной работы при повышенных температурах // Технология легких сплавов. 2009. №4. С. 6–31.
15. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 440–448.