

УДК 620.178.35

*В.В. Антипов¹, М.В. Григорьев¹, А.Н. Коновалов¹,
А.А. Мешков², Н.Ю. Серебренникова¹*

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ КЛЕПКИ НА МАЛОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ КЛЕПАНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛИСТОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-3-8

Заклепочные соединения в конструкции авиационной техники занимают одно из главных мест среди технологических процессов при сборке конструктивных элементов. Технология изготовления заклепочных соединений достаточно хорошо отработана и выпущено большое количество нормативной документации. Однако в ней отсутствуют материалы нового поколения, которые имеют определенные особенности при изготовлении заклепочного соединения с учетом подготовительной работы. Особенностью сплавов 1441 и В-1481 являются дополнительные требования к технологии изготовления заклепочных соединений в связи с их (сплавов) высокой жесткостью и чувствительностью к ударным нагрузкам и постоянно действующим напряжениям в заклепочном шве при натягах в отверстиях.

Ключевые слова: *алюминий-литиевые сплавы, заклепки общего применения, заклепки с компенсатором, прессовая клепка, ударная клепка, малоцикловая усталость.*

*V.V. Antipov¹, M.V. Grigoryev¹, A.N. Konovalov¹,
A.A. Meshkov², N.Yu. Serebrennikova¹*

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF RIVETING ON THE LOW-CYCLE FATIGUE OF RIVETED CONNECTION SHEETS OF ALUMINUM-LITHIUM ALLOYS

Riveted joints in the construction of aviation engineering occupy one of the main places among technological processes during the assembly of structural elements. Manufacturing technology of riveted joints is well-proven and a great deal of reference documentation is released. However, in this documentation there are not presented the most advanced materials, with characteristic features during the process of riveted connection with prework taken into account. The distinctive feature of 1441 and B-1481 alloys is additional requirements for manufacturing technology of riveted joints due to the alloys' high rigidity and sensitivity to impact loads and constant stresses in the riveted seam under tension in the holes.

Keywords: *Al-Li alloys, rivets of general application, rivets with compensator, press rivet, impact rivet, low-cycle fatigue.*

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

²Открытое акционерное общество «Национальный институт авиационных технологий» [Open Joint Stock Company «National Institute of Aviation Technologies»], e-mail: info@niat.ru

Введение

При разработке новых конструкций все большее значение приобретает использование материалов с пониженными характеристиками плотности, что обеспечивает снижение весовых характеристик самолета в целом. Сборка самолетных конструкций продолжает осуществляться с помощью механических соединений в виде болтов и заклепок. При применении новых материалов в конструкции требуется отработка режимов клепки, оценки стабильности и прочностных характеристик соединений с учетом выбранного способа крепежа.

Авиастроение является одной из отраслей, активно стимулирующей появление новых материалов. При этом зачастую основной задачей является повышение весовой эффективности деталей воздушных судов. Данная характеристика напрямую связана с экономической эффективностью эксплуатации летательного аппарата, поскольку снижение массы отдельных конструкций при сохранении их эксплуатационных характеристик позволяет увеличить полезную нагрузку. Одним из направлений, позволяющим решать эту задачу, является применение при изготовлении авиационных деталей сплавов пониженной плотности [1–3].

Сравнительные свойства сплавов 1441, В-1481 и 1163

Свойства	Значения свойств для сплава		
	1441	В-1481	1163
d , г/см ³	2,60	2,69	2,78
E , ГПа	78	78	71
σ_b , МПа	431	520	420
$\sigma_{0,2}$, МПа	323	480	375
δ_5 , %	7	6	5
K_c^y , МПа $\sqrt{м}$	100	131	118
МЦУ: N , кцикл ($K_f=2,6$, $\sigma_{max}=157$ МПа)	170	216	110
Примечание. Механические характеристики сплавов приведены применительно к листам толщиной 1,5 мм в состоянии термической обработки Т1.			

В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» разработан ряд алюминиевых сплавов, содержащих в качестве легирующего элемента литий, плотность которого составляет $\sim 0,53$ г/см³ [4, 5]. Помимо пониженной плотности, алюминий-литиевые сплавы обладают высоким модулем упругости при растяжении. Данные сплавы разработаны с целью замены традиционных среднепрочных алюминиевых сплавов, применяемых в авиастроении. В табл. 1 приведены механические характеристики высокопрочных алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1481 в сравнении с традиционным среднепрочным сплавом 1163.

Несмотря на очевидные достоинства новых материалов, их применение при изготовлении летательных аппаратов сопряжено с рядом трудностей. Технологические параметры традиционных материалов (например, таких как среднепрочные сплавы Д16ч., 1163 и высокопрочные В95п.ч., В95о.ч.) хорошо изучены, на предприятиях авиационной промышленности отлажены технологии работы с этими материалами. При работе с указанными новыми материалами зачастую необходима доработка технологии изготовления деталей, при этом далеко не всегда в полной мере известны их конечные эксплуатационные характеристики. В связи с этим обстоятельством в настоящее время продолжается ведение значительного количества работ, посвященных исследованиям алюминий-литиевых сплавов [6–11].

Одним из основных видов соединения листовых материалов в авиастроении является соединение с помощью заклепок. В связи с этим изучение прочностных характеристик данного типа соединений применительно к указанным новым материалам представляет значительный интерес. В данной работе изучена малоцикловая усталость (МЦУ) соединений алюминий-литиевых сплавов, выполненных с помощью заклепок.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 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») [3].

Материалы и методы

В качестве объекта исследований использовали листы из алюминий-литиевых сплавов марок 1441 и В-1481 толщиной 1,5 мм. Исходя из толщины пакета, сформированного из листов алюминий-литиевых сплавов, при проведении работы использовали заклепки диаметром 4 мм, длиной 8 мм и с минимальной высотой замыкающей головки 1,6 мм. В качестве материала для изготовления заклепок использовали высокопрочный алюминиевый сплав марки В65. Одним из основных показателей качества клепаного соединения является величина натяга, сформированного по завершении процесса деформации заклепки. В связи с этим первоначальной задачей являлось определение зависимости величины натяга от технологических параметров процесса клепки применительно к алюминий-литиевым сплавам. Величина натяга определяется, в том числе, типом заклепок. Существует большое количество различных видов заклепок, применяемых в соответствии с требованиями к формируемому соединению. Различают заклепки общего применения и специального назначения. В случаях, когда заклепки не участвуют в формировании соединений, обтекаемых воздушным потоком, применяются заклепки с плоско-скругленной головкой. Одним из стандартов, регламентирующих размеры заклепок с плоско-скругленной головкой, является ОСТ1 34076–85. Заклепки, изготовленные по данному стандарту, применяются для соединений в слабо- и средненагруженных каркасных узлах – например, при соединении внутренних элементов каркаса планера. Еще одной большой группой заклепок, применяемых в авиастроении, являются заклепки с потайной головкой. При использовании такого типа заклепок закладная головка располагается на одном уровне с плоскостью листа собираемого пакета. В некоторых случаях применяются заклепки с компенсаторами, позволяющие увеличить натяг и герметичность соединения. Для изучения влияния параметров формирования соединения заклепками, имеющими потайную головку с компенсатором, выбраны заклепки, изготавливаемые по ОСТ1 34047–80. Заклепки, поставляемые по данному стандарту,

Краткие характеристики примененных в работе заклепок

Характеристика	Заклепки по ОСТ1 34076–85	Заклепки по ОСТ1 34047–80
Наименование	Заклепки с плоско-скругленной головкой	Заклепки с уменьшенной потайной головкой <90 градусов с компенсатором
Рекомендации по применению	Для соединений в слабо- и средненагруженных каркасных узлах	Для соединений в тонких обшивках с повышенными сопротивлением усталости и герметичностью
Диаметр отверстия под заклепку, мм	4,1 ^{+0,12}	
Диаметр замыкающей головки, мм	6,0±0,4	

применяются для соединений в тонких обшивках повышенных ресурса и герметичности, выходящих на теоретический контур. В частности, заклепки такого типа широко применяются при сборке панелей фюзеляжа и крыла с обеспечением герметичности соединений и требований к обтекаемым поверхностям. Таким образом, при определении зависимости величины натяга от типа заклепки использовали заклепки общего применения и заклепки с компенсатором. Краткие характеристики использованных в работе заклепок приведены в табл. 2.

При выполнении работы применяли как прессовый, так и ударный методы клепки. Прессовую клепку проводили с помощью стационарного прессы КП-204М, ручную – с использованием пневматического клепального молотка КМП-24.

Испытания на МЦУ проводили на машине MTS-100 по ОСТ1 00872–77, частота нагружения составляла 15 Гц, значение максимального напряжения в рамках одного цикла (σ_{\max}) не превышало 167 МПа. Для испытаний использовали первый тип образцов, сформированный двухрядным соединением внахлест. При этом следует отметить, что особое внимание следует уделять выбору нагрузки в рамках одного цикла нагружения. Поскольку ОСТ1 00872–77 не содержит однозначного указания, каким образом следует оценивать площадь сформированного внахлест соединения, при проведении испытаний образцов такого типа результаты испытаний могут существенно отличаться в зависимости от трактовки методики проведения испытаний. Некоторые испытательные лаборатории при расчете площади образца учитывают толщину двух пластин, в то время как другие – тол-

щину только одной пластины. Какую бы точку зрения не разделял испытатель, главным условием для проведения сравнения полученных результатов является неизменность подхода при расчете площади сформированного клепаного образца. Авторы данной работы полагают более правильным использовать при расчете площади соединения толщину одной пластины.

Результаты и обсуждение

Напряженно-деформированное состояние материала в зоне отверстия при выполнении соединения характеризуется радиальным натягом. На величину натяга при выполнении соединений заклепками общего применения и заклепками с компенсатором влияет изменение параметров отверстия (диаметр и шероховатость отверстия) и степень осадки заклепки (размеры замыкающей головки).

Натяг определяется как относительное увеличение диаметра отверстия в процессе осадки заклепки. Для расчета натяга принимается следующее: диаметр отверстия после клепки равен диаметру заклепки после клепки.

Полученные результаты по величинам натягов в зоне постановки заклепок в зависимости от соотношений диаметров отверстий и фактических диаметров заклепки при ее постановке в соответствии с требованиями нормативной документации приведены на рис. 1 и 2. Следует отметить, что для средних натягов подобные данные отсутствуют (пунктирная часть диаграмм), однако можно полагать, что существенных изменений в зависимостях на этих участках не предвидится, поскольку шаг изменения натягов весьма невелик.

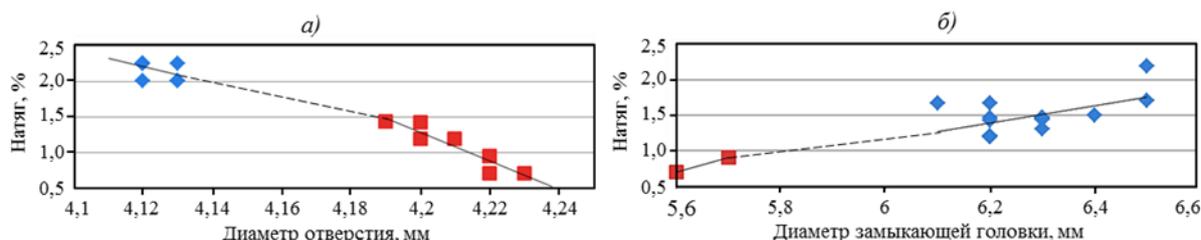


Рис. 1. Влияние соотношения диаметров заклепок и отверстий на величину натяга заклепок общего применения (по ОСТ1 34076–85)

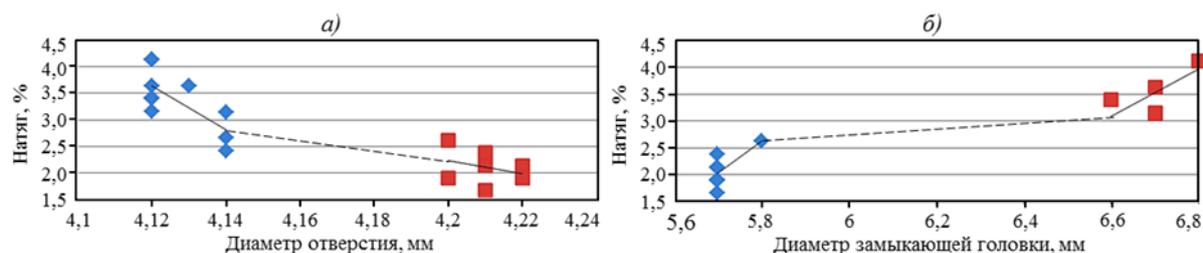


Рис. 2. Влияние соотношения диаметров заклепок и отверстий на величину натяга заклепок с компенсатором (по ОСТ1 34047–80)

Из полученных зависимостей видно, что увеличение диаметра замыкающих головок приводит к увеличению натяга. Данное обстоятельство обусловлено наличием прямой зависимости деформации внутри пакета от деформации заклепки. Таким образом, полученные зависимости свидетельствуют о том, что одной из управляемых характеристик при изготовлении заклепочного соединения является диаметр отверстия, так как размеры заклепок регламентированы нормативной документацией.

Для оценки и получения возможного разброса по характеристикам при изготовлении заклепочных соединений использовали два способа клепки – прессовый и ударный. При формировании соединений прессовая клепка является предпочтительной, поскольку позволяет получать более стабильное качество соединений, выдерживая заданную величину натяга. Таким образом, в случае использования прессового способа клепки появляется дополни-

тельная управляемая характеристика при изготовлении заклепочного соединения. В случае ударной клепки, из-за влияния большого количества дополнительных факторов (прежде всего человеческого), выдержать стабильную величину натяга в условиях массового производства практически невозможно. Однако в ряде случаев ударная клепка является единственно возможной – например, в местах, затрудненных для подхода прессового оборудования. Поэтому при изготовлении образцов для проведения испытаний на МЦУ использовали прессовый и ударный способы. Применение полученных ранее зависимостей позволило оценивать величину натяга заклепки исходя из диаметра замыкающей головки без разборки соединения и измерения диаметров отверстий. На рис. 3 и 4 представлены зависимости усталостной долговечности при испытаниях на МЦУ клепанных листовых образцов из сплавов марок 1441 и В-1481.

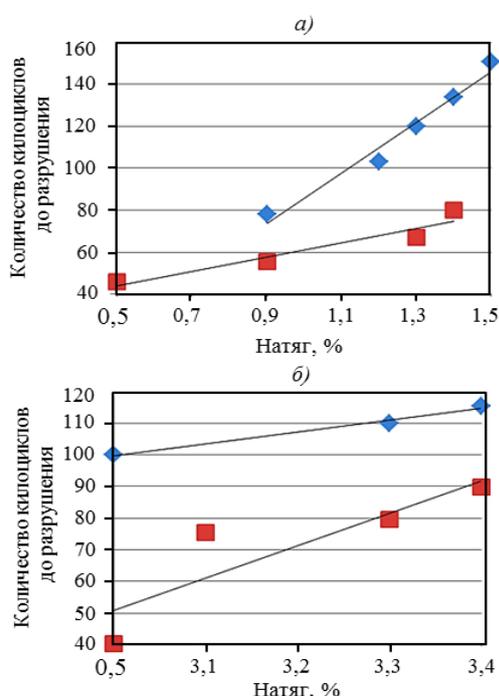


Рис. 3. Влияние метода клепки, типа применяемых заклепок (а – общего применения; б – с компенсатором) и величины натяга на величину МЦУ клепанных соединений листов из сплава марки 1441 при соединении прессовым (◆) и ударным способом (■)

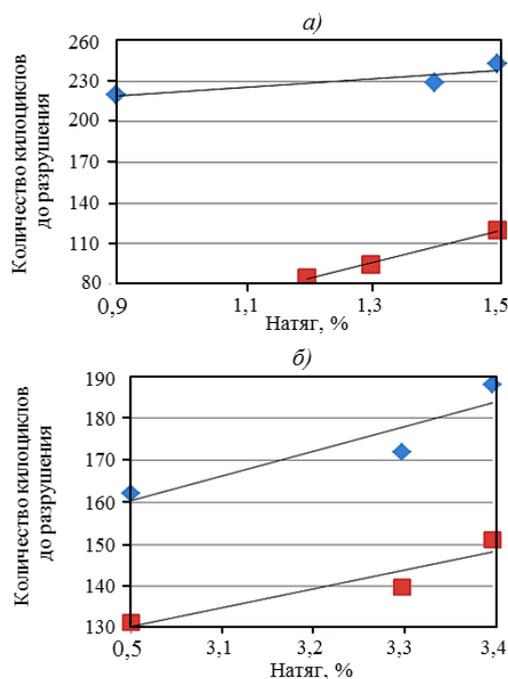


Рис. 4. Влияние метода клепки, типа применяемых заклепок (а – общего применения; б – с компенсатором) и величины натяга на величину МЦУ клепанных соединений листов из сплава марки В-1481 при соединении прессовым (◆) и ударным способом (■)

Полученные зависимости позволяют сделать следующие выводы. Во всех рассмотренных случаях усталостная долговечность соединений повышается по мере увеличения степени натяга. Однако следует отметить, что по мере повышения натягов усиливается и продольная деформация сформированного соединения. Повышение продольной деформации приводит к короблению и появлению прогибов клепаных образцов, которые также увеличиваются при повышении степени натяга заклепок. Величина коробления зависит не только от степени натяга, но и от шага заклепок в шве. Чем больше величина шага заклепок, тем меньше коробление сформированного клепаного соединения. При этом по мере увеличения шага наблюдаются снижение прочностных и ресурсных свойств клепаного шва, снижение герметичности соединений и другие нежелательные, а порою и недопустимые последствия. В связи с этим шаг заклепок определяется в результате конструкторского расчета на прочность и выбирается в соответствии с действующей нормативной документацией. Существуют общие рекомендации по размещению заклепок при клепке. В частности, минимальное расстояние от кромки заготовки должно быть не менее $2d$, где d – диаметр заклепки.

Применение прессового способа соединений позволяет получать большие значения усталостной долговечности при МЦУ по сравнению с образцами, изготовленными ударным способом. При формировании соединений с помощью заклепок общего применения прессовым способом при наибольших натягах наблюдается уровень усталостной долговечности, сопоставимый с паспортными значениями материалов.

Выявленные зависимости усталостной долговечности от способа и технологических параметров клепки получены при величине нагружения $\sigma_{max}=167$ МПа. Очевидно, что при увеличении нагрузки во время растяжения количество циклов до разрушения образца будет снижаться. Вообще, исследования зависимости ресурсной долговечности от параметров проведения испытаний (прилагаемая нагрузка, частота нагружения, концентрация напряжений, асимметрия цикла, среда проведения испытаний и др.) представляют значительный интерес, особенно применительно к механическому соединению полуфабрикатов из новых сплавов. В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» такие работы ведутся применительно ко многим современным авиационным сплавам [12–18]. У авторов данной работы также имеются предварительные результаты испытаний клепаных соединений листов из сплава 1441, проведенные при различной величине нагружения (рис. 5).

Полученные результаты позволяют утверждать, что по мере увеличения нагрузки при испытаниях на МЦУ влияние способа клепки на усталостную долговечность соединения снижает-

ся. Представленную на рис. 5 зависимость, несомненно, необходимо уточнить, однако на основании имеющихся данных можно сделать вывод о том, что ее характер весьма близок к гиперболе второго порядка, что соответствует имеющимся теоретическим зависимостям, представленным в работе [19].

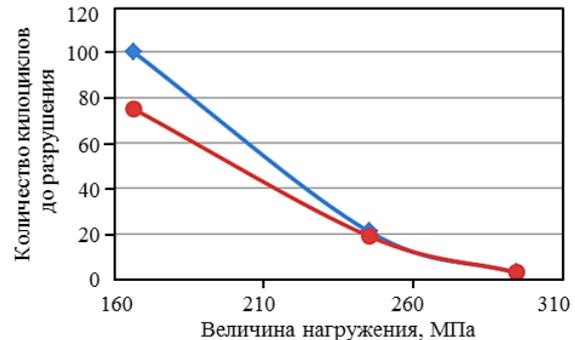


Рис. 5. Влияние величины нагружения и способа соединения (♦ – прессовый способ; ● – ударный способ) на ресурсную долговечность клепаных соединений листов из сплава марки 1441 (заклепки с компенсатором)

Заключения

1. Получены результаты по величинам натягов в зоне постановки заклепок в зависимости от соотношений диаметров отверстий и фактических диаметров заклепок. Исследованные заклепки с компенсатором имеют большую степень натяга (от 1,5 до 4,5%), чем заклепки общего применения (от 0,5 до 2,5%).
2. Усталостная долговечность клепаных соединений увеличивается по мере роста величины натяга, однако высокие значения натяга могут приводить к продольной деформации формируемых соединений.
3. При выполнении заклепочных соединений листов из сплавов марок 1441 и В-1481 предпочтительнее применять прессовый метод, поскольку он обеспечивает большую усталостную долговечность, чем ударный способ деформации заклепок. Использование прессового способа для заклепок общего применения обеспечивает прирост значений усталостной долговечности клепки более чем в 2 раза. В случае применения заклепок с компенсатором прирост значений усталостной долговечности менее значителен и составляет около 20–30%.
4. По мере увеличения нагрузки при испытаниях на МЦУ клепаных листов из сплава марки 1441 влияние способа деформации заклепок на усталостную долговечность соединений снижается. При циклических напряжениях от 250 МПа соединения, полученные клепаным и ударным способами, имеют весьма близкие значения усталостной долговечности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект & Технологии. 2016. №2. С. 41–46.
2. Каблов Е.Н. О настоящем и будущем ВИАМ и отечественного материаловедения: интервью // Российская академия наук. 2015. 19 янв. С. 10–15.
3. 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.
4. Лещинер Л.Н., Лагушкина Л.В., Федоренко Т.П. Сплав 1441 системы Al–Cu–Mg–Li // Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. «Металловедение сплавов алюминия с литием». М.: ВИЛС, 1991. С. 76–77.
5. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // Цветные металлы. 2016. №8 (884). С. 86–91.
6. Жегина И.П., Григоренко В.Б., Морозова Л.В., Фомина М.А. Исследование изменения состояния поверхностных слоев алюминийлитиевых сплавов 1441 и В-1469 при комплексном воздействии напряжений и коррозионно-активной среды // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S4. С. 65–69. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-65-69.
7. Оглодков М.С., Григорьев М.В., Пахомкин С.И., Рябова Е.Н. Исследование влияния режимов гомогенизации на механические свойства крупногабаритных слитков из алюминий-литиевого сплава марки В-1481 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №8 (56). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-1-1.
8. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Козлова О.Ю., Пантелеев М.Д., Осипов Н.Н., Клычев А.В. Технологические особенности изготовления деталей из алюминий-литиевого сплава 1441 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №10 (70). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-17-26.
9. Карачевцев Ф.Н., Летов А.Ф., Проценко О.М., Якимова М.С. Разработка и применение стандартных образцов перспективных сплавов авиационного назначения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №10 (46). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-8-8.
10. Морозова Л.В., Исходжанова И.В. Исследование закономерностей изменения рельефа поверхности образцов из алюминийлитиевых сплавов методом лазерной микроскопии // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №10. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-8-8.
11. Лукина Е.А., Алексеев А.А., Хохлатова Л.Б. и др. Фазовые превращения в процессе длительных температурных нагревов для промышленных сплавов 1224, В-1469 и 1441 // Физика металлов и металловедение. 2011. №3. С. 253–261.
12. Каблов Е.Н., Морозова Л.В., Григоренко В.Б., Жегина И.П., Фомина М.А. Исследование влияния коррозионной среды на процесс накопления повреждений и характер разрушения конструкционных алюминиевых сплавов 1441 и В-1469 при испытаниях на растяжение и малоцикловую усталость // Металловедение. 2017. №1. С. 41–48.
13. Kablov E.N., Morozova L.V., Grigorenko V.B., Zhagina I.P., Fomina M.A. Study of the influence of a corrosive medium on the process of damage accumulation and the nature of failure of structural aluminum alloys 1441 and V-1469 under tensile and low-cycle fatigue testing // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. No. 4. P. 594–602.
14. Григорьев М.В., Оглодков М.С. Влияние механической обработки на механические и усталостные свойства листов из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1481 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №4 (64). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-20-27.
15. Гриневич А.В., Румянцев Ю.С., Морозова Л.В., Терехин А.Л. Исследование усталостной долговечности алюминиевых сплавов 1163-Т и В950.ч.-Т2 после поверхностного упрочнения // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S4. С. 93–102. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-93-102.
16. Горбовец М.А., Кочетков Д.А., Ходинев И.А. Анализ и сравнение российского и зарубежного стандартов, устанавливающих методы испытаний на термомеханическую усталость // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №4 (52). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-11-11.
17. Беляев М.С., Хвацкий К.К., Горбовец М.А. Сравнительный анализ российского и зарубежных стандартов испытаний на усталость металлов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №9. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-11-11.
18. Оспенникова О.Г., Наприенко С.А., Автаев В.В. Влияние морской воды на сопротивление многоцикловой усталости сплава ВТ3-1 при различных коэффициентах асимметрии нагружения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2019. №1 (73). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-115-124.
19. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1983. С. 322–324.