

УДК 620.1

Н.О. Яковлев¹, А.А. Селиванов¹, И.В. Гулина¹, А.В. Гриневич¹**К ВОПРОСУ О ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ШАРНИРНО-БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-79-85

Рассматривается вопрос о долговечности шарнирно-болтовых соединений в условиях воздействия коррозионной среды. Приведен анализ напряженно-деформированного состояния материала проушин в соединениях с натягом. Установлена возможность коррозионного растрескивания для проушин в случае воздействия коррозионной среды. Получено экспериментальное подтверждение разрушения материала проушин в соединении с натягом. Предложена разработка методики испытания конструкционных материалов при длительном действии постоянных напряжений и коррозионной среды в условиях заданной деформации.

Ключевые слова: шарнирно-болтовое соединение, проушина, коррозионная среда, натяг, коррозионное растрескивание.

N.O. Iakovlev¹, A.A. Selivanov¹, I.V. Gulina¹, A.V. Grinevich¹**REVISITING THE DURABILITY
OF HINGED-BOLT CONNECTIONS**

The paper considers the issue of durability of hinged-bolt joints under the influence of a corrosive environment. There has been performed the analysis of the stress-strain state of the eyes' material in the preloaded joints. Possibility of corrosion cracking of the eyes in case of exposure to a corrosive medium has been determined. Experimental confirmation of The destruction of the eyes' material in a preloaded joint has been confirmed experimentally. The article proposes the development of the testing methodology of structural materials under the prolonged exposure to constant stress and corrosive medium under the conditions of a given deformation.

Keywords: hinged-bolt connection, eye, corrosive medium, preload, corrosion cracking.

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

Шарнирно-болтовые соединения являются неотъемлемой частью авиационной конструкции, обеспечивая стыковочное крепление крыльев, подвески двигателей, стабилизаторов, килей, а также функционирование взлетно-посадочных устройств самолета и его механических систем управления [1]. Разрушение шарнирно-болтового соединения в шасси летательного аппарата или в системе управления может создать аварийную ситуацию, что приводит к необходимости комплексного анализа работоспособности конструкционного материала [2–7].

Основными элементами шарнирно-болтовых соединений являются проушина, вилка и соединительный болт. Материал в проушинах шарнирно-болтовых соединений работает в условиях растяжения, сжатия и значительных контактных нагрузок. Определяющими для оценки прочности шарнирно-болтового

соединения являются статическая прочность проушин и вилки на разрыв и смятие, а болта – на срез и смятие. Проушина, нагружаемая изнутри болтом, является концентратором напряжений. Следует учитывать, что коэффициент концентрации определяется не только геометрической формой проушины, но и зависит от степени сопрягаемости поверхностей болта и проушины [8]. Для кольцевой проушины с отношением внутреннего диаметра к внешнему, равным 0,5, теоретический коэффициент концентрации напряжений равен $K_t=3$ при нулевом зазоре, а при зазоре, равном 0,01 мм от внутреннего диаметра, коэффициент концентрации увеличивается до значений $K_t=4,5$. Следует отметить, что для зазора 0,003 мм от внутреннего диаметра и при отношении внутреннего диаметра к внешнему 0,1 теоретический коэффициент концентрации достигает величины $K_t=10$.

Оценка прочности и долговечности шарнирно-болтового соединения должна исходить не из упрощенной схемы равномерно распределенной контактной нагрузки сопрягаемых поверхностей, а с учетом неравномерной деформации проушин и изгиба болта. Современные модели оценки прочности шарнирно-болтовых соединений учитывают геометрическую форму сопрягаемых поверхностей, характеристики материалов проушин и болта, а также дефектность контактных поверхностей, связанную с их шероховатостью, овальностью, конусностью, что обусловлено нарушением технологических режимов или износом в процессе эксплуатации.

Несмотря на достаточно детальную проработку проблемы несущей способности шарнирно-болтовых соединений с позиций прочности, практика эксплуатации воздушных судов выявляет единичные факты их разрушения.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [9].

Материалы и методы

В одном из типичных шарнирно-болтовых соединений имело место разрушение проушины из алюминиевого сплава. Общий вид разрушенной проушины представлен на рис. 1.

Возможной и наиболее очевидной причиной разрушения могли явиться переменные нагрузки. Однако после очистки излома от продуктов коррозии фрактография поверхностей разрушения не выявляла типичных бороздок, которые должны были предшествовать усталостному разрушению. Поверхность излома в полной мере отвечала статическому характеру разрушения. Прочность материала

проушины соответствовала техническим условиям на поставку материала, что исключало версию о некондиционности материала. Для повышения усталостной долговечности проушины в нее была запрессована стальная втулка. Создание натяга целесообразно не только с позиции повышения усталостной долговечности проушины, но и позволяет избежать проскальзывания поверхностей сопряжения и возникновения очага разрушения вследствие фреттинг-коррозии. Особенность рассматриваемой конструкции состоит в том, что запрессованная стальная втулка является одновременно соединительным элементом двух проушин-дублеров, что позволяет обеспечить функционирование агрегата даже при образовании трещины в одной из проушин. Предположение о возможной статической перегрузке проушины, приведшей к разрушению, исключается отсутствием повреждения проушины-дублера. Натяг, который значительно увеличивает усталостную долговечность, приводит одновременно к росту статической нагрузки на проушину.

Анализ напряженно-деформированного состояния проушины основан на расчете толстостенных цилиндрических оболочек, нагруженных внутренним давлением [10].

Прошину следует рассматривать как толстостенный цилиндр, нагруженный внутренним давлением. Для проушины внутреннее давление реализуется за счет натяга при постановке болта или втулки в прошину. Натяг определяется как разность диаметров: внешнего диаметра втулки или болта и внутреннего диаметра проушины. На рис. 2 представлено кольцо-прошина с запрессованной втулкой. Разница размеров контактных диаметров кольца и втулки с установленными допусками (для принятой посадки) обуславливает изменение величины натяга от минимальной до максимальной его величины.

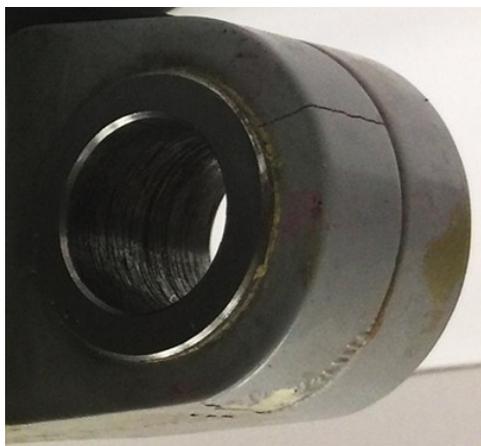


Рис. 1. Общий вид разрушенной проушины с запрессованной стальной втулкой

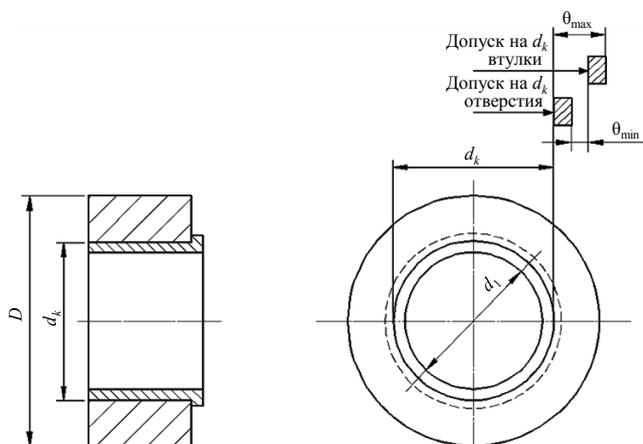


Рис. 2. Прошина-кольцо с запрессованной втулкой

Контактное давление p_k , которое рассматривается как внутреннее давление на проушину, линейно связано с натягом следующей зависимостью:

$$p_k = \frac{\theta/d_k}{\frac{1}{E_1} \left(\frac{1+K_1^2}{1-K_1^2} - \mu_1 \right) + \frac{1}{E_2} \left(\frac{1+K_2^2}{1-K_2^2} + \mu_2 \right)}, \quad (1)$$

где θ – натяг, мм; p_k – контактное давление от натяга, МПа; d_k – номинальный диаметр сопрягаемых цилиндрических поверхностей, мм; $K_1=d_1/d_k$ – коэффициент толстостенности втулки; $K_2=d_k/D$ – коэффициент толстостенности проушины; D – внешний диаметр проушины, мм; d_1 – внутренний диаметр втулки, мм; E_1 – модуль упругости материала втулки, ГПа; E_2 – модуль упругости материала проушины, ГПа; μ_1 – коэффициент Пуассона для материала втулки; μ_2 – коэффициент Пуассона для материала проушины.

Оценка контактного давления на внутренней поверхности проушины дает возможность определения действующих в ней напряжений. Схема действующих окружных и радиальных напряжений в проушине представлена на рис. 3.

В упругой постановке задачи главные действующие напряжения на любом радиусе кольца-проушины определяются по формулам Ляме. Радиальные (σ_r) и окружные (σ_t) напряжения в кольце-проушине определяются по следующим формулам:

$$\sigma_r = \frac{p_k \cdot r_k^2}{R^2 - r_k^2} \cdot \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right); \quad (2)$$

$$\sigma_t = \frac{p_k \cdot r_k^2}{R^2 - r_k^2} \cdot \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right), \quad (3)$$

где p_k – контактное давление; $R=D/2$ – внешний радиус проушины, мм; $r_k=d_k/2$ – внутренний радиус проушины, мм; r – произвольный радиус для проушины, мм.

Проведем оценку действующих напряжений, приняв за исходные параметры реальные габариты проушины. Внешний диаметр алюминиевой проушины примем равным $D=36$ мм, а внутренний диаметр контактирующей поверхности $d_k=22$ мм. Внешний номинальный диаметр стальной полый втулки, запрессованной в проушину, равен $d_k=22$ мм, а внутренний диаметр – $d_1=18$ мм. Проушина выполнена из плиты алюминиевого сплава, а втулка – из стали. Марки стали и алюминиевого сплава не имеют значения для оценки контактного давления, поскольку, в соответствии с методикой расчета, определяющими характеристиками материалов как для проушины, так и для втулки, являются их модули упругости. Подставив в формулу (1) геометрические характеристики сопрягаемых элементов $K_1=0,82$ и $K_2=0,61$, а также соответствующие значения модулей упругости: для стали – $E_1=196$ ГПа, для алюминиевого сплава – $E_2=70,6$ ГПа и коэффициентов Пуассона (соответственно $\mu_1=0,32$, $\mu_2=0,33$), получим линейную зависимость контактного давления от натяга – $p_k=761 \cdot \theta$ МПа.

Оценка внутреннего давления в зависимости от натяга на проушину, которая имитируется толстостенным кольцом, позволяет определить окружные и радиальные напряжения, действующие в проушине.

Проведем оценку действующих напряжений в кольце-проушине, задавшись используемой в практике посадкой $22 \frac{H7}{U8}$. Поле допуска на отверстие в алюминиевой проушине $\varnothing 22H7$ находится в пределах $22,000-22,021$ мм.

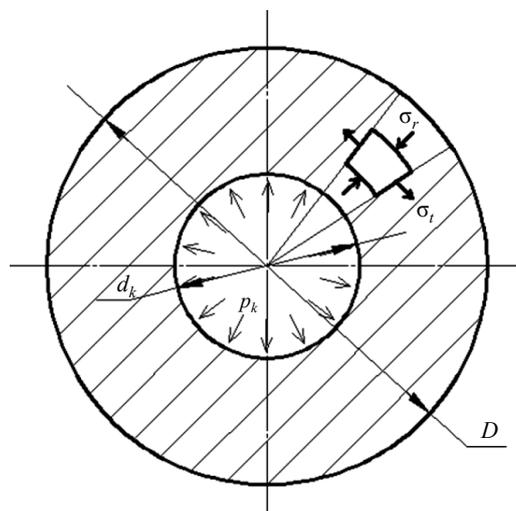


Рис. 3. Напряжения в проушине от контактного давления

Для стальной втулки (болта $\varnothing 22U8$) поле допуска составляет 22,041–22,074 мм. Максимальный натяг достигается при минимальном диаметре отверстия и максимальном диаметре втулки, а минимальный натяг – при минимальном диаметре втулки и максимальном диаметре отверстия. Следовательно, максимальный натяг может быть оценен величиной 0,074 мм, а минимальный 0,020 мм. При анализе действующих напряжений целесообразно рассмотреть и средний натяг, который наиболее часто встречается в сопряжениях. Примем среднюю величину натяга, равной $\theta=0,047$ мм. Задавшись максимальной, средней и минимальной величиной натяга, а также используя формулы (2) и (3), проведем оценку окружных и радиальных напряжений для проушины. На рис. 4 представлены графики изменения окружных (σ_t) и радиальных (σ_r) напряжений: от d_k – контактного диаметра до D – внешнего диаметра свободной поверхности кольца-проушины.

Анализ напряженно-деформированного состояния при создании натяга в проушине показывает, что материал проушины находится под действием растягивающих и сжимающих напряжений, которые достигают максимальных значений в зоне сопряжения и снижаются по мере перехода к внешней поверхности. На внешней поверхности проушины действуют только растягивающие окружные напряжения, а радиальные равны нулю. Результаты оценки изменения напряжений для конкретного варианта проушины показывают, что растягивающие окружные напряжения на поверхности проушины почти в 2 раза меньше, нежели на сопрягающейся поверхности со стальной втулкой.

Поскольку растягивающие напряжения от натяга для проушины имеют максимальные

значения на внутренней поверхности проушины, то логично предположить, что начало статического разрушения будет иметь место от внутренней поверхности проушины [10]. В пользу данной версии свидетельствует установленный факт наличия рисок на внутренней поверхности проушины, образовавшихся при запрессовке стальной втулки. Риска, являясь концентратором напряжений, могла послужить инициатором начала разрушения проушины. Однако гипотеза разрушения проушины в зоне сопряжения от напряжений растяжения, вызванных натягом, может объяснить начало разрушения, но не объясняет разрушение проушины, поскольку образование трещины в зоне сопряжения должно ликвидировать натяг.

Наряду с версией разрушения от внутренней поверхности проушины выдвинуто предположение о возможности разрушения от внешней поверхности проушины, контактирующей с коррозионной средой. Необходимость учета влияния коррозионной среды на прочностные характеристики конструкционных материалов нашла отражение в ряде исследований [11, 12]. Несмотря на тот факт, что напряжения растяжения на внешней стороне проушины значительно (почти в 2 раза) меньше, чем в зоне сопряжения, они достаточны для реализации коррозионного растрескивания. Фактор анизотропии начинает становиться значимым при оценке прочностных характеристик конструкционных материалов [13, 14]. Ранее проведенные исследования по коррозионному растрескиванию выявили значительное влияние анизотропии сплава 1163-Т на уровень критического напряжения разрушения. Оценка критического напряжения при испытании на коррозию под напряжением в условиях заданной деформации для плиты сплава 1163-Т установила уровень

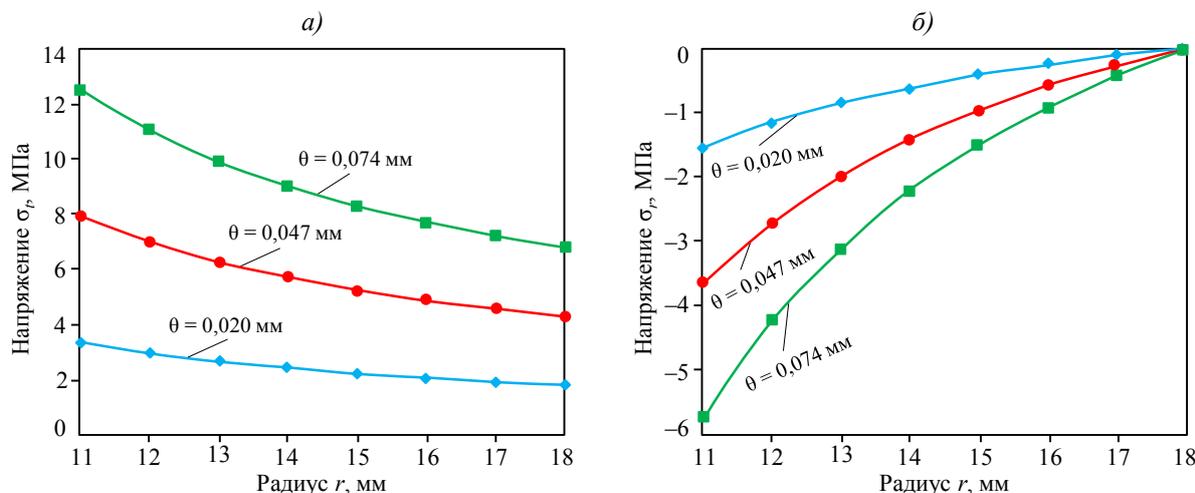


Рис. 4. Распределение окружных (а) и радиальных (б) напряжений по толщине кольца-проушины при разной величине натяга θ

разрушающего напряжения: 235 МПа – для образцов, вырезанных в продольном направлении; 137 МПа – в поперечном направлении и 54 МПа – в высотном направлении. Данные результаты получены при периодическом погружении образцов в 3%-ный раствор NaCl. Очевидно, что условия эксплуатации проушины не столь жесткие, как в коррозионных испытаниях, но крайне низкий уровень критического напряжения сплава 1163-Т в высотном направлении указывает на возможность коррозионного разрушения внешней поверхности проушины. Гипотеза разрушения проушины от натяга требовала экспериментального подтверждения.

Для оценки возможности разрушения проушины от натяга предложена следующая методика испытаний. В основе методики – испытание кольцевого образца, имитирующего проушину. Диаметры образца соответствовали типичной проушине и равнялись: внутренний – $d_k=22$ мм, а внешний – $D=36$ мм. Образцы вырезали из плиты сплава 1163-Т с соответствующей ориентацией, учитывающей анизотропию материала, обусловленную направлением прокатки. Схема вырезки кольцевых образцов и их индексация представлены на рис. 5. Для реализации натяга использовали стальной вал из стали 30ХГСА с номинальным диаметром $d_k=22$ мм. Выбор стали 30ХГСА обусловлен ее широким использованием в авиационной промышленности и относительно небольшой стоимостью. Для того чтобы обеспечить заданную величину натяга, предварительно изготавливали кольцо-проушину и после определения внутреннего диаметра с точностью до 1 мкм под данный размер подгоняли вал (втулку) с припуском под заданный натяг. Затем задавали припуск порядка 0,06–0,07 мм для реализации максимального натяга, имевше-

го место в рассматриваемой конструкции. Данная последовательность операций значительно снижала трудоемкость по сравнению с подбором пары, изготавливаемой по допускам.

После подбора пары «кольцо–вал» проводили запрессовку вала и сборочный узел выставляли на экспозицию в коррозионную среду.

Оценку напряжений на внешнем и внутреннем контуре кольца проводили по формулам (2) и (3), а определение контактного давления – по формуле (1), которую можно несколько упростить, поскольку вал не имеет внутреннего отверстия:

$$p_k = \frac{\theta/d_k}{\frac{1}{E_1} \cdot (1-\mu_1) + \frac{1}{E_2} \cdot \left(\frac{1+K_2^2}{1-K_2^2} + \mu_2 \right)}. \quad (4)$$

Сборочные узлы, в которых определяющим элементом являлось кольцо-проушина, выставляли на экспозицию в камеру солевого тумана (КСТ) и Геленджикский центр климатических испытаний (ГЦКИ). Данный выбор обусловлен как ускоренным методом оценки коррозионного разрушения, так и приближением коррозионных воздействий к эксплуатационным [15–17].

Результаты и обсуждение

Сборочные узлы в виде кольца из сплава 1163-Т и вала из стали 30ХГСА, выставленные в КСТ и ГЦКИ, не имели защитных покрытий. В КСТ продукты коррозии практически полностью покрывали сборочный узел, поэтому отслеживать кинетику разрушения не представлялось возможным. Факт разрушения был установлен только после съема сборочного узла и его освобождения от продуктов коррозии. Разрушение имело место на образце с вырезкой в высотном направлении В-П.

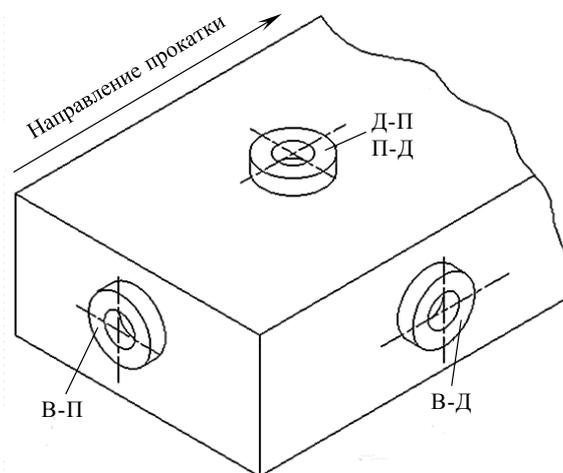


Рис. 5. Схема вырезки кольцевых образцов в плите из сплава 1163-Т и их маркировка

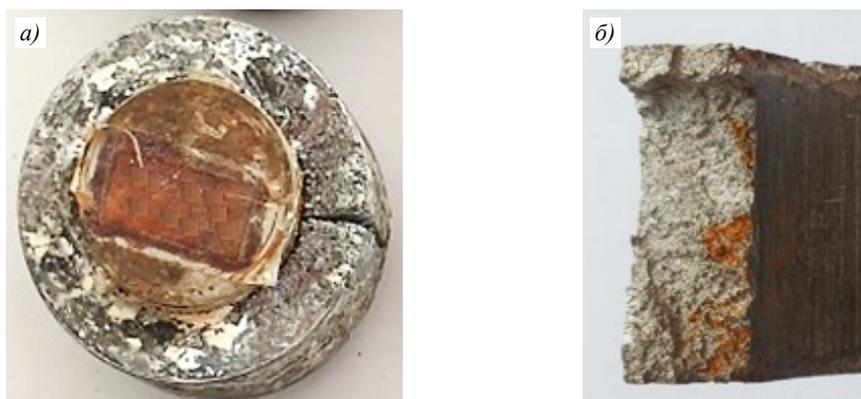


Рис. 6. Общий вид кольца-проушины с запрессованной втулкой (а) и поверхность излома (б) после экспозиции в камере солевого тумана

Общий вид сборочного узла с разрушенным кольцом-проушиной представлен на рис. 6, а, характер зоны разрушения – на рис. 6, б. Зона разрушения имеет сложный рельеф, обусловленный многоочаговостью зарождения трещин, объединение которых и привело к окончательному разрушению. Зарождение трещин проходило не в одной, а в разных плоскостях, что и привело к многоуровневому разрушению. Многочисленные коррозионные поражения явились очагами зарождения коррозионных трещин, что и вызвало сложный характер поверхности разрушения. На внутренней поверхности излома, граничащего со стальной втулкой, замечены следы ржавчины, которые образовались от коррозии стальной втулки. Следы ржавчины могут явиться косвенным доказательством, что трещины зарождались на внутренней поверхности кольца-проушины. Однако трещины со следами ржавчины развивались только на глубину $\sim 1/3$ от толщины кольца. По-видимому, имело место торможение трещин, зародившихся на внутренней поверхности кольца-проушины, обусловленное снижением уровня напряжений при удалении от зоны контакта проушины и запрессованной втулки.

На образцах, экспонировавшихся в ГЦКИ, также зафиксировано разрушение кольца-проушины от натяга, вызванного запрессовкой стальной втулки. На рис. 7 представлен общий вид сборочного узла после экспозиции в ГЦКИ в течение 185 сут.

Характер коррозионного поражения колец-проушин, экспонированных в КСТ и ГЦКИ, существенно различается. Образование сквозной трещины на проушине в КСТ сопровождалось возникновением множественных коррозионных язв с плотной пленкой продуктов коррозии. Внешний вид коррозионного разрушения кольца-проушины, экспонированной в ГЦКИ, в большей степени соответствовал характеру разрушения проушины, которое имело место при эксплуатации.

Проведенные испытания образцов в коррозионной среде КСТ и натуральных условиях ГЦКИ подтвердили возможность разрушения проушин в шарнирно-болтовых соединениях от внутренних напряжений, создаваемых натягом в условиях воздействия окружающей среды. При конструировании шарнирно-болтовых соединений необходимо учитывать напряжения, создаваемые натягом; коррозионную среду, в которой

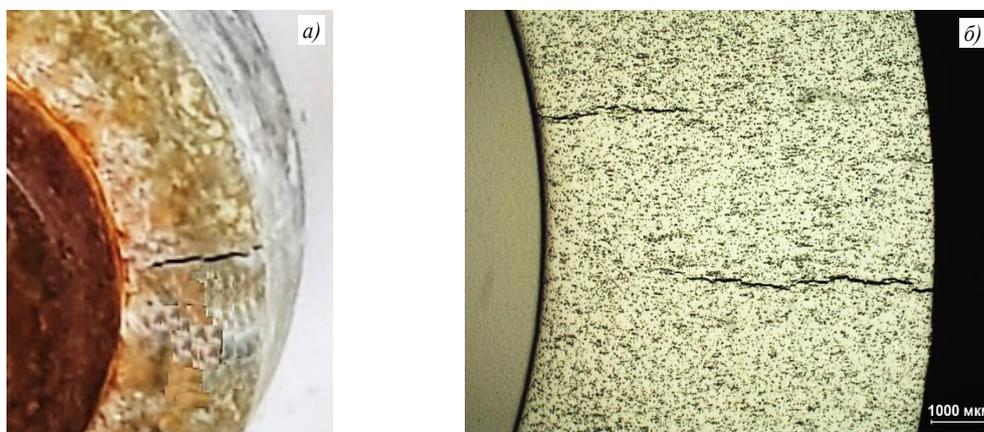


Рис. 7. Сквозная трещина на кольце-проушине после экспозиции в ГЦКИ

эксплуатируется агрегат, а также принимать во внимание анизотропию материала.

Формирование однородного напряженного состояния на поверхности кольца-проушины, характеризующегося только растягивающим главным напряжением, является основанием рассматривать пару «проушина–болт» как основу для разработки методики испытания конструкционных материалов в условиях длительного воздействия растягивающих напряжений и коррозионной среды.

Заключения

Проведена оценка напряженного состояния в шарнирно-болтовом соединении, в котором используются проушины с натягом.

Установлена и экспериментально подтверждена возможность разрушения проушин от растягивающих напряжений, обусловленных натягом и длительным воздействием коррозионной среды.

Показана необходимость при оценке долговечности шарнирно-болтового соединения учитывать натяг, воздействие коррозионной среды и анизотропию материала.

Предложено использовать сборочный узел «кольцо–вал» для оценки сопротивления материала коррозионному растрескиванию при длительном действии постоянных напряжений и коррозионной среды в условиях постоянно заданной деформации.

Библиографический список

1. Бойцов Б.В., Кишкина С.И., Кравченко Г.Н., Афанасьев П.П., Анисимова Н.В. Долговечность шарнирно-болтовых соединений летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1996. 256 с.
2. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Новосибирск: Наука, 2005. 1110 с.
3. Лепов В.В. Надежность и ресурс технических систем в экстремальных условиях эксплуатации // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. №86 (6). С. 36–39.
4. Баутин А.А., Свирский Ю.А., Панков А.В. Мониторинг состояния конструкции с помощью анализа кинетики местного напряженно-деформированного состояния // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. №85 (2). С. 42–47.
5. Каблов Е.Н., Гриневиц А.В., Ерасов В.С. Характеристики прочности металлических авиационных материалов и их расчетные значения // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 370–379.
6. Гриневиц А.В., Яковлев Н.О., Скрипачев С.Ю., Нужный Г.А. Коррозионное растрескивание сталей различной прочности в условиях постоянного раскрытия трещины // Деформация и разрушение материалов. 2019. №1. С. 43–48.
7. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
8. Майнсков В.Н. Проектирование соединения элементов авиационных конструкций: учеб. пособие. Самара, 2006. 72 с.
9. 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.
10. Справочник машиностроителя: в 6 т. / под ред. С.В. Серенсена. М.: Машгиз, 1962. Т. 3. 652 с.
11. Греченцев Е.С., Ильяшенко А.А. Соединения с натягом. Расчеты, проектирование, изготовление. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.
12. Каблов Е.Н., Гриневиц А.В., Луценко А.Н., Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гулина И.В. Исследование кинетики разрушения конструкционных алюминиевых сплавов при длительном действии постоянной нагрузки и коррозионной среды с использованием образца нового типа // Деформация и разрушение материалов. 2016. №10. С. 42–48.
13. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Демин С.А., Чесноков Д.В. Защита от коррозии углеродистых сталей // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 242–263. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263.
14. Махутов Н.А., Макаренко И.В., Макаренко Л.В. Кинетика разнонаправленности упругопластического разрушения при учете анизотропии свойств материала // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. №86 (1). С. 44–50.
15. Judt P.O., Ricoeur A., Zinek G. Crack path prediction in rolled aluminum plates with fracture toughness orthotropy and experimental validation // Engineering Fracture Mechanics. 2015. Vol. 138. P. 33–48.
16. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2015. №2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
17. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 2. Новые подходы к оценке коррозионности приморских атмосфер // Коррозия: материалы и защита. 2016. №1. С. 1–15.
18. Панова И.М., Панов А.Д. Анализ надежности соединений с натягом в особых условиях эксплуатации // Наукоедение: интернет-журнал. 2017. Т. 9. №4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/26TVN417.pdf> (дата обращения: 12.06.2020).