

УДК 620.1

А.Н. Луценко¹, А.В. Славин¹, В.С. Ерасов¹, К.К. Хвацкий¹

ПРОЧНОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546

Проведены испытания элементов авиационных и строительных конструкций статическим и циклическим силовым нагружением на испытательном стенде в ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова. На примере их комплексных испытаний, совмещенных с климатическими, показано, что стенды и силовой пол ГЦКИ обладают уникальными возможностями для одновременного проведения натурных механических и климатических испытаний крупногабаритных конструкций.

В конструкциях типовой вертикальной колонны, строительной балки и конструктивно-подобного образца сварной гибридной панели крыла значимых повреждений в процессе испытаний методами неразрушающего контроля не выявлено, что подтвердило высокое качество элементов из металлических и полимерных композиционных материалов, а также обеспечение заданных при проектировании ресурсных и прочностных характеристик конструкций. Оценка жесткости всех испытанных элементов конструкций показала, что влияющих на несущую способность повреждений, вызванных силовым или климатическим воздействием, не выявлено.

Исследованы характеристики многоциклового усталости (МнЦУ) нескольких жаропрочных титановых сплавов. В качестве характеристик МнЦУ приняты значение предела выносливости, форма кривой усталости и другие. Рассмотрено воздействие таких факторов, как температура испытания и концентрация напряжений.

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») [1].

Ключевые слова: механические испытания, натурные климатические испытания, испытания элементов конструкций, коррозия, многоцикловая усталость (МнЦУ), предел выносливости, параметры испытаний, жаропрочные титановые сплавы.

¹ 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

A.N. Lutsenko, A.V. Slavin, V.S. Erasov, K.K. Khvatskiy

Strength tests and researches of aviation materials

Tests of elements of aircraft and building structures have been carried out for static and cyclic power loading on the test bench in Gelendzhik climatic testing center. This example of the full-scale tests, combined with climatic, shows that the benches and power floor of Gelendzhik climatic testing center have unique capabilities for simultaneous in situ mechanical and climatic tests of large structures.

In the construction of a model of vertical column, beams construction and structurally similar model of a hybrid welded wing panel tested by NDT methods significant damages have not been revealed, that confirmed the high quality of the elements from metal and polymer composite materials as well as provision of resource and strength characteristics of structures specified in the design. Evaluation of stiffness of all tested structural elements have shown that damages caused by load or climatic factors which would influence on the bearing capacity have not been identified.

In this paper High-Cycle Fatigue (HCF) characteristics of several heat resistant titanium alloys were investigated. The value of fatigue limit, shape of the S–N curve and others were accepted as characteristics of HCF. Influence of such factors as test temperature and stress concentration was considered.

The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 2. «Fundamental the oriented researches, qualification of materials, non-destructive testing» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: *mechanical tests, full-scale climatic testing, testing of structural elements, corrosion, high cycle fatigue (HCF), fatigue limit, testing parameters, heat resistance titanium alloys.*

Введение

Специфика географического и климатического положения России, низкая плотность наземной транспортной сети на значительной протяженности не только Северных, Дальневосточных и Сибирских районов, но и центра России, обуславливают необходимость широкого использования авиационного транспорта [2].

Одним из важных вопросов в современном авиастроении является вопрос обеспечения надежности и безотказности работы конструктивных элементов планера. На этапе проектирования, включающем расчеты на прочность конструкции, используют разработанные модели взаимодействия материалов с внешними силовыми и температурными воздействиями. В качестве мер выявления преждевременных разрушений элементов конструкций при эксплуатации проводятся их статические испытания, которые выявляют ошибки проектирования и несовершенства методов

расчета напряженно-деформированного состояния конструкции, а также циклические испытания, необходимые для выполнения принципов безопасного срока службы, безопасного разрушения и допустимости повреждений.

С другой стороны, известна проблема устойчивости конструкции при воздействии внешней среды, которая, как правило, приводит к коррозионным поражениям. Борьбой с коррозией и механическим износом материаловеды занимаются ровно столько времени, сколько существует материаловедение [3]. Известно, что коррозионное повреждение поверхности ухудшает выносливость конструкции, а постоянная силовая нагрузка повышает коррозионную активность поверхности элемента конструкции («коррозия под напряжением»). В реальных условиях добавляется воздействие солнечного излучения, эрозионных процессов, осадков и других, временами сложно прогнозируемых, факторов, что предопределяет процессы старения и деградации материалов. Особенно сильное влияние климатические факторы оказывают на полимерные композиционные материалы (ПКМ) – под воздействием этих факторов могут существенно изменяться прочностные характеристики, что необходимо учитывать при проектировании изделий авиационной техники [4].

В России есть два испытательных центра по климатическим испытаниям, соответствующих международным стандартам. Один – в Москве, с площадкой на крыше одного из корпусов Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ»), где проходят испытания в условиях города с развитой промышленностью и большим количеством автомобилей. Другой – в Геленджике, на берегу моря, в Центре климатических испытаний ВИАМ им. Г.В. Акимова [5]. По климатическим признакам Геленджикский центр характеризуется повышенной коррозионной агрессивностью атмосферы (9 баллов по ГОСТ 9.039; С3 (средняя) по ISO 9223) и принадлежит к умеренно теплomu климату с мягкой зимой (ГОСТ 16350). Среднегодовая температура составляет 14°C, относительная влажность воздуха 73%, количество осадков ~800 мм/год. Таким образом, успешно проведенные испытания элементов конструкций в климатическом центре с повышенной коррозионной агрессивностью атмосферы дают возможность рекомендовать к использованию конструкции во всеклиматических условиях (практически вся территория РФ).

Другой не менее важный вопрос современного авиастроения – обеспечение надежности работы двигателя и его элементов. В деталях конструкции авиационных двигателей используются различные жаропрочные титановые сплавы [6–9]. Технологические процессы изготовления полуфабрикатов и деталей авиационных ГТД постоянно

совершенствуются [10–14]. При оценке эффективности технологических процессов определяют, в частности, характеристики многоциклового усталости (МнЦУ) титановых сплавов. В данной работе проанализированы характеристики МнЦУ некоторых жаропрочных титановых сплавов, полученные при обобщении отдельных исследований. При обработке и анализе результатов испытаний на МнЦУ использованы необходимые научно-технические литературные источники. Испытания на МнЦУ во всех случаях проведены в условиях, соответствующих ГОСТ 25.502–79 с изменением №1, утвержденным в декабре 1985 г., «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость».

Материалы и методы

Рассмотрим примеры проведения *механических испытаний* элементов конструкций на силовом полу ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова.

По техническому заданию ВИАМ фирмой Walter+bai ag Testing Machines (Швейцария) разработаны два стенда для испытаний крупногабаритных конструкций, позволяющие проводить испытания на силовом полу ГЦКИ в условиях одновременного воздействия климатических факторов при заданных статических и циклических нагрузках: вертикальный стенд с максимальным усилием до 25 тс (рис. 1) и горизонтальный стенд с усилием до 100 тс (рис. 2).



Рис. 1. Вертикальный стенд для испытаний крупногабаритных конструкций с максимальным усилием 25 тс



Рис. 2. Горизонтальный стенд для испытаний крупногабаритных конструкций с максимальным усилием 100 тс

Стенды предназначены для проведения натурных испытаний крупногабаритных элементов конструкций в условиях теплого умеренного климата на стойкость к коррозии, старению и биоповреждениям металлических и композиционных конструкционных материалов, а также их соединений в сочетании с периодическими циклическими силовыми нагрузками. Оба стенда и все их детали изготовлены в защищенном от отрицательных воздействий атмосферных условий виде и сохраняют свою работоспособность при годовом перепаде температур от -17 до $+37^{\circ}\text{C}$, влажности 99% и порывах ветра до 40 м/с. Мониторинг данных при испытаниях на вертикальном и горизонтальном стендах осуществляется с использованием специальной программы, имеющей возможность построения графиков зависимостей в реальном времени (рис. 3).

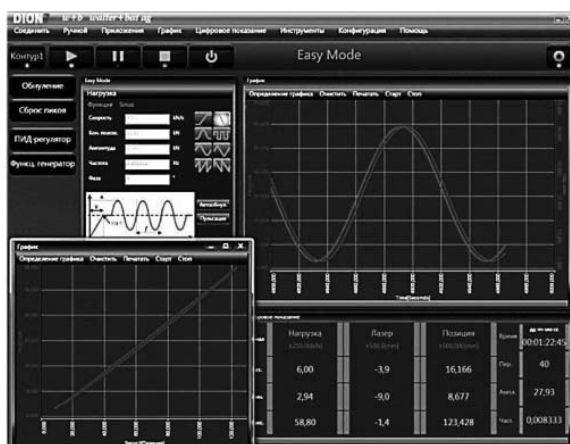


Рис. 3. Вид окна программы для проведения испытаний на вертикальном и горизонтальном стендах

Строительная балка

Совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана проведены механические испытания крупногабаритной конструкции линии электропередачи – опытного образца строительной балки и типовой вертикальной колонны. Строительная балка имеет размеры $3000 \times 150 \times 250$ мм (рис. 4).



Рис. 4. Внешний вид строительной балки, установленной на испытательный стенд

В процессе испытаний строительной балки контролировали момент наступления потери несущей способности, которая определяется неспособностью выдерживать максимальные эксплуатационные нагрузки без частичного или полного разрушения элементов конструкции.

Испытания строительной балки проводили с приложением максимального изгибающего момента 450 кН·м. Строительную балку устанавливали на испытательный стенд в горизонтальном положении таким образом, чтобы были обеспечены условия консольного изгиба (рис. 5). Поэтому с одной стороны строительная балка закреплена на $0,5$ м в заделке, а с другой – через специальную оснастку («серьгу») соединена с гидроцилиндром испытательного стенда, который создает вектор тяги, направленный вертикально вверх. Для получения требуемого изгибающего момента ($M_{\text{изг}}$) к вершине строительной балки перпендикулярно оси прикладывали сосредоточенную силу, равную

$$F_{\text{изг}} = \frac{M_{\text{изг}}}{L}, \quad (1)$$

где L – длина свободной части строительной балки, м.

Нагружение проводили в течение 15 мин плавно, до усилий $F_{\text{изг}}$: 50 , 100 , 150 кН и максимального уровня 180 кН, соответствующего максимальному изгибающему моменту 450 кН·м, после чего образец также плавно разгружали. Вторым этапом испытаний строительной балки являлась

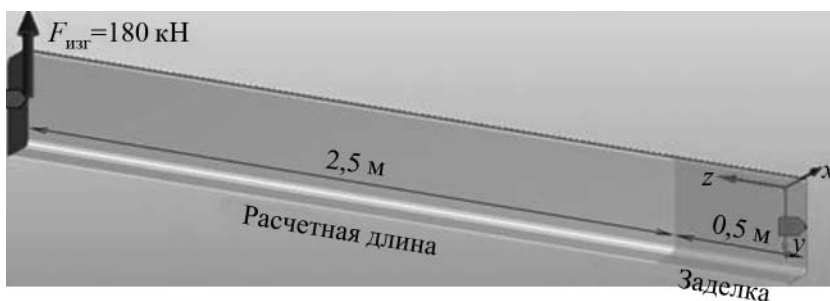


Рис. 5. Схема приложения нагрузки на строительную балку

проверка расчетного предельного состояния строительной балки до усилий $F_{изг}$: 50, 100, 150, 200 кН и максимального усилия 216 кН, соответствующего превышению расчетной нагрузки на 20%.

Типовая вертикальная колонна (ТВК)

Типовая вертикальная колонна имеет длину 6003 мм и наружный диаметр 1204 мм (рис. 6).



Рис. 6. Внешний вид вертикальной колонны, установленной на испытательный стенд

Аналогично случаю со строительной балкой, контролировали момент наступления потери несущей способности конструкции. Вертикальную колонну устанавливали на испытательный стенд в горизонтальном положении. Нагружение проводили с одновременным приложением изгибающего (1500 кН·м) и крутящего моментов (171 кН·м). Для реализации крутящего момента вертикальную колонну соединяли с нагружающим цилиндром испытательной машины через специальную оснастку («серьгу») в крайней точке – относительно вертикальной оси симметрии колонны (рис. 7).

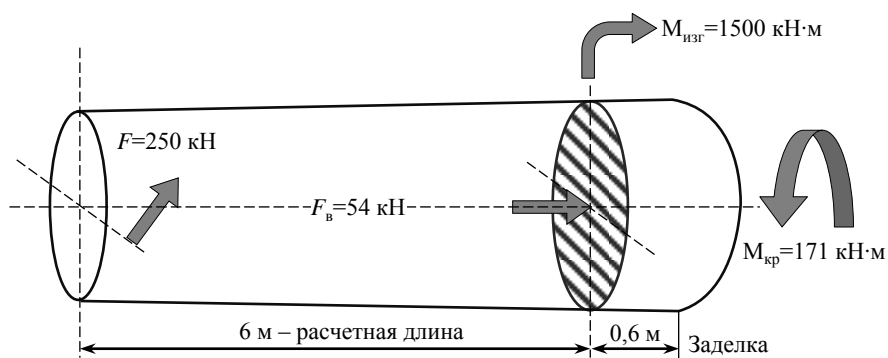


Рис. 7. Схема приложения нагрузки на вертикальную колонну

Нагружение проводили до усилий $F_{изг}$: 50, 100, 150, 200 кН и максимального уровня 250 кН, соответствующего максимальному изгибающему моменту 1500 кН·м и крутящему моменту 171 кН·м, после чего образец разгружали. Вторым этапом испытаний вертикальной колонны являлась проверка расчетного предельного состояния ТВК до усилий Физг: 50, 100, 150, 200 кН и до максимального усилия 275 кН, соответствующего превышению расчетной нагрузки на 10%. Для исследования влияния климатических факторов на свойства материалов, после проведения испытаний ТВК выставлена на климатические испытания.

После 2 лет климатических испытаний секции ТВК проведено нагружение, соответствующее по повреждаемости ветровым нагрузкам с различным периодом эксплуатации.

Конструктивно-подобный образец верхней сварной гибридной панели крыла

Разработанный во ФГУП «ВИАМ» конструктивно-подобный образец верхней сварной гибридной панели крыла представляет собой двухстрингерную панель длиной 600 мм, изготовленную из прессованной полосы сплава В-1469 (рис. 8). Для увеличения жесткости панели применяли усиление гибридными накладками (слои углепластика с разделяющими слоями стеклопластика) полок стрингера и обшивочной части.

Для подтверждения работоспособности конструкции проводили два вида испытаний: при статическом нагружении и циклическом нагружении после экспозиции в течение 3 мес. Статическое нагружение панели-прототипа (верхняя панель центроплана самолета Ту-204СМ) до расчетных значений максимальных сжимающих напряжений проводили с целью обеспечения целостности конструктивно-подобного образца с углепластиковыми

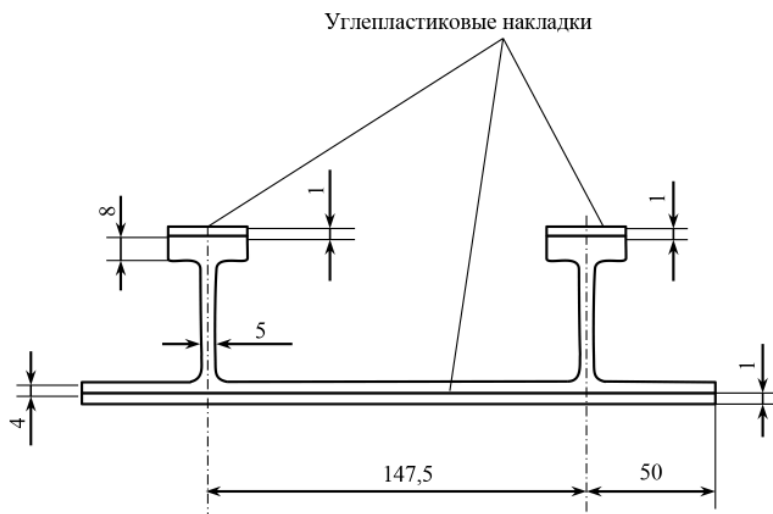


Рис. 8. Профиль конструктивно-подобного образца верхней сварной гибридной панели крыла

накладками [15], поскольку в конструкции присутствуют сдвиговые напряжения, которые потенциально могут привести к отслоению гибридных накладок от основной панели крыла. Циклическое нагружение после экспозиции в натуральных условиях теплого умеренного климата приморской зоны (ГЦКИ) необходимо для определения динамики изменения силовых характеристик при наличии контактной коррозии (алюминий-литиевый сплав В-1469 и углепластик) и внешних климатических условий.

Нагружение зоны углепластиковых накладок напряжениями, соответствующими предельным напряжениям сжатия, полученным на фрагменте панели крыла при статических испытаниях на сжатие (потеря устойчивости при 441 МПа), проводили при испытаниях на трехточечный изгиб, при котором обшивка панели и гибридные наклейки испытывают сжимающие напряжения, а стрингеры с накладками – растягивающие. Схема нагружения и расположение фрагмента сварной гибридной панели крыла на испытательном стенде представлены на рис. 9 и 10.

По формуле (2) проведен расчет предельной нагрузки при изгибе, которая нагрузит верхние слои – обшивку со сварным швом и приклеенной гибридной накладкой размером 247,5×600 мм, напряжениями сжатия, равными напряжениям потери устойчивости:

$$F_{\text{изг}} = \frac{4W\sigma}{L_v}, \quad (2)$$

где W – момент сопротивления сечения; σ – напряжение потери устойчивости; L_v – расстояние между опорами.



Рис. 9. Схема нагружения конструктивно-подобного образца верхней сварной гибридной панели крыла на трехточечный изгиб



Рис. 10. Внешний вид конструктивно-подобного образца верхней сварной гибридной панели крыла, установленной на испытательный стенд

Предельная нагрузка при изгибе, соответствующая напряжению потери устойчивости 441 МПа, составила $F_{\text{изг}} = 143$ кН. В связи с последующими климатическими и циклическими испытаниями конструктивно-подобного образца, он нагружался ступенчато до уровня нагрузок, не превышающих предельные: 0,3; 0,6; 0,8 от $F_{\text{изг}}$. После каждого нагружения панель разгружали, проводили анализ экспериментальных данных, а также визуальный осмотр на предмет разрушения или потери устойчивости элементов панели (стрингеров или обшивки).

Циклические испытания конструктивно-подобного образца проводили со следующими параметрами испытания: пилообразный цикл с максимальной нагрузкой 47,8 кН, соответствующей максимальному эквивалентному напряжению в цикле $\sigma_{\text{экв}} = 150$ МПа, принятому в панели-прототипе; коэффициент асимметрии $R=0,1$; количество циклов нагружения $N=100$.

После проведения климатических (экспозиция 4 мес) и циклических испытаний проведен осмотр фрагментов на предмет разрушения (отслоения гибридных накладок, пластические деформации).

Рассмотрим пример исследования *характеристик МнЦУ жаропрочных титановых сплавов*.

При проведении исследования использована схема нагружения – чистый изгиб с вращением образца (ГОСТ 25.502–79), которая обеспечивает проведение испытаний при симметричном цикле на-пряжения $R_{\sigma} = -1$. Применены образцы кругового сечения с гладкой рабочей частью (ГОСТ 25.502–79) и образцы с кольцевым концентратором напряжений (надрезом). Диаметр рабочей части гладкого образца и минимального сечения образца с надрезом составлял 7,5 мм, радиус в вершине надреза 0,5 мм. У образца с надрезом значение теоретического коэффициента концентрации напряжений составляло $\alpha_{\sigma} = 2,33$. Все образцы каждого типа изготовлены по одной технологии [16].

Испытания проведены на испытательных машинах МВИ-611М при 20°С и эксплуатационной температуре. Частота нагружения образцов составляла $f = 50$ Гц, база испытания – не менее $N = 2 \cdot 10^7$ циклов. Критерием разрушения являлось разделение образца на две части в области минимального сечения рабочей части. В каждой выборке имелись образцы, которые не разрушились в пределах установленной базы испытаний, а также при испытаниях с более высокой долговечностью. Испытания таких образцов прекращены, образцы сняты с испытательной машины. Количество циклов испытания зафиксировано и внесено в таблицы результатов испытаний – такие образцы считали неразрушенными.

Всего в работе испытано 12 партий (выборок) образцов. Характеристики сопротивления МнЦУ получены по результатам испытаний не менее 12 образцов в одной выборке. Отметим, что в 10 выборках из 12 количество испытанных образцов превышало 15 шт. Для каждого сплава сформировали четыре выборки образцов, т. е. гладкие образцы испытывали при температурах 20°С и повышенной, образцы с надрезом – так же.

Средние значения пределов выносливости на заданной базе испытания при комнатной и эксплуатационной температурах определены в соответствии с требованием ГОСТ 25.502–79. Кривые усталости по результатам испытаний ограниченного объема образцов строят методом графического интерполирования экспериментальных результатов или по способу наименьших квадратов.

В данной работе при обработке результатов испытаний применен подход, основанный на линейном регрессионном анализе для случая детерминированной независимой величины. Эмпирическое уравнение кривой усталости принято в форме степенной функции $\sigma^m N = C$, которая после логарифмирования преобразуется в линейную зависимость $\lg N = a + b \lg \sigma$. Пользуясь методом наименьших квадратов, расчетным путем определяли значения коэффициентов a и b , средние значения предела выносливости.

В системе логарифмических координат построили линию («кривую») выносливости, соответствующую вероятности неразрушения 50% (средняя линия выносливости). Описанная процедура не может быть применена для горизонтального участка кривой усталости.

При проведении механических испытаний элементов конструкций на силовом полу ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова получены следующие результаты.

Строительная балка

В предельном состоянии разрушения конструкции строительной балки не произошло, визуально наблюдаемого разрушения изделия также не зафиксировано. В табл. 1 приведены результаты силового нагружения строительной балки.

Таблица 1

Результаты проведения силового нагружения строительной балки (СБ)

Усилие, кН	50	100	150	200	216
Деформация СБ, мм	22	49	85	135	149

На рис. 11 представлена диаграмма «нагружения—разгрузки» строительной балки.

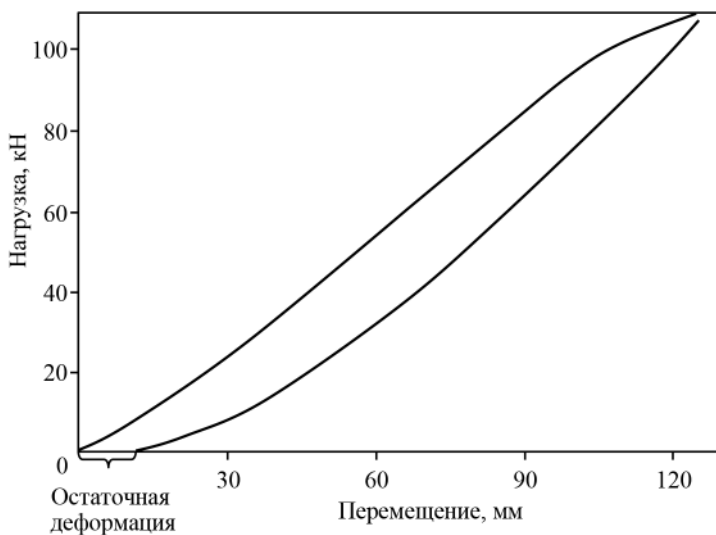


Рис. 11. Диаграмма «нагружения—разгрузки» строительной балки

Типовая вертикальная колонна

В процессе испытаний при проектируемых нагрузках разрушения конструкции не произошло, визуально наблюдаемого разрушения изделия также не зафиксировано. В табл. 2 приведены результаты силового нагружения вертикальной типовой колонны.

Таблица 2

Результаты проведения силового нагружения типовой вертикальной колонны (ТВК)

Усилие, кН	50	100	150	200	275
Деформация ТВК, мм	30	60	90	119	165

На рис. 12 представлена диаграмма «нагружения–разгрузки» типовой вертикальной колонны.

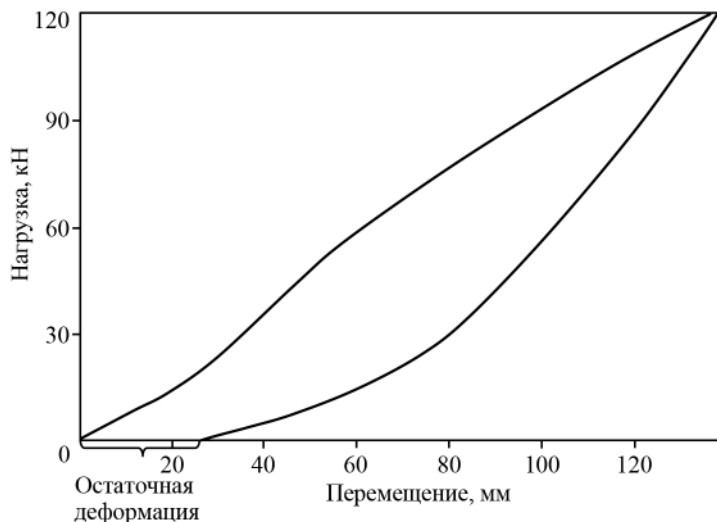


Рис. 12. Диаграмма «нагружения–разгрузки» типовой вертикальной колонны

Конструктивно-подобный образец верхней сварной гибридной панели крыла

Установлено, что при напряжениях, превышающих расчетные значения для панели-прототипа из сплава В95о.ч.-Т2 (верхняя панель центроплана самолета Ту-204СМ), на конструктивно-подобном образце верхней сварной гибридной панели крыла признаков начала разрушения не обнаружено. Следует отметить, что при испытаниях на изгиб по сечению панели возникает градиент напряжений, что обуславливает появление дополнительных сдвиговых напряжений между обшивкой

панели и гибридными накладками. Таким образом, при испытаниях на изгиб гибридные накладки работали по более нагруженному режиму, чем при испытаниях на сжатие. На рис. 13 представлена диаграмма деформирования конструктивно-подобного образца верхней сварной гибридной панели крыла на изгиб.

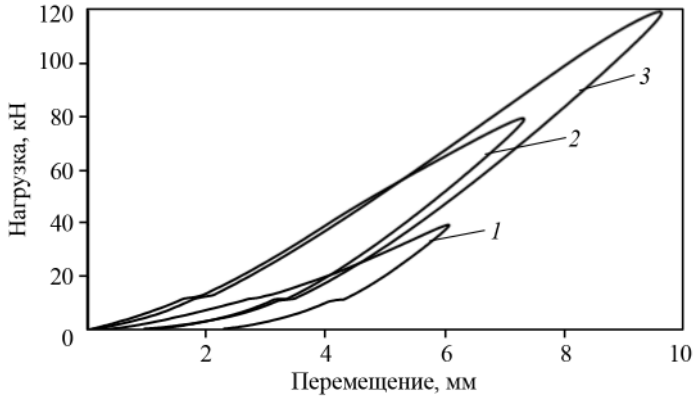


Рис. 13. Диаграмма деформирования конструктивно-подобного образца верхней сварной гибридной панели крыла на изгиб при величине нагружения 40 (1), 80 (2) и 120 кН (3), а затем разгрузки

Жесткость конструктивно-подобного образца при изгибе $E \cdot I$ рассчитана по формуле (3) и равна $820 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ (данное значение приняли в качестве исходного при исследованиях воздействия натуральных условий умеренно теплого климата с мягкой зимой):

$$E \cdot I = \frac{\Delta\sigma I}{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta P L_v \Delta z I}{4W_z \Delta\rho}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости; I – момент инерции; $\Delta\sigma$ – приращение напряжения; $\Delta\varepsilon$ – приращение деформации; ΔP – приращение напряжений на линейном участке диаграммы деформирования; Δz – приращение прогиба при увеличении нагрузки; $\Delta\rho = \frac{z_1(L_v + 4z_2^2) - z_2(L_v + 4z_1^2)}{8z_1z_2}$ – приращение радиуса кривизны при увеличении нагрузки; z_1, z_2 – граничные точки участка кривизны.

Проведены металлографические исследования зоны «алюминиевый сплав–гибридная накладка», которые показали отсутствие видимых следов коррозионных поражений (рис. 14).

При визуальном осмотре не выявлено разрушений конструктивно-подобного образца, последующий неразрушающий контроль сварного соединения также подтвердил отсутствие дефектов в зоне сварного шва после испытаний. Это свидетельствует о возможности использования

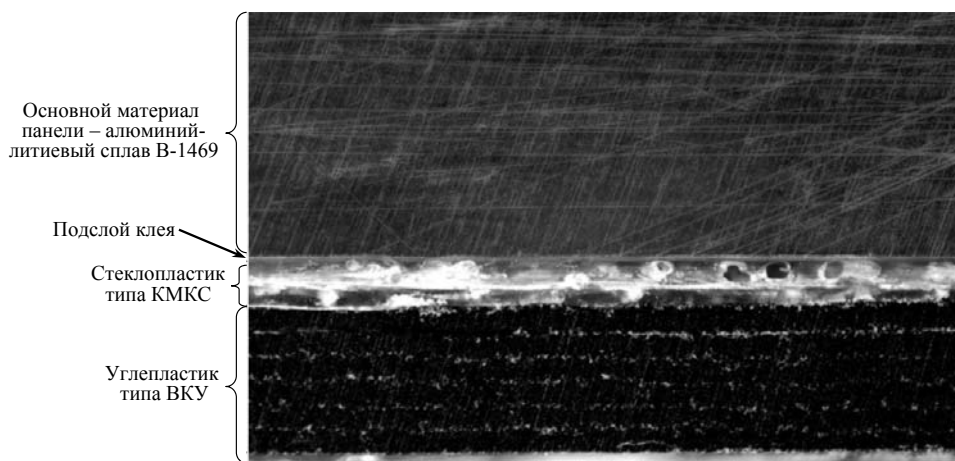


Рис. 14. Фрагмент торцевой стороны конструктивно-подобного образца на границе «алюминиевый сплав–гибридная накладка»

гибридных накладок в составе верхней сварной гибридной панели крыла, а также их способности сопротивляться циклическим напряжениям, возникающим на границе обшивочного полотна и гибридных накладок, равных эквивалентному напряжению $\sigma_{\text{экв}} = 147$ МПа (в рамках линейного суммирования при программном нагружении центроплана самолета Ту-204СМ).

При исследовании *характеристик МнЦУ* жаропрочных титановых сплавов получены следующие результаты.

Для жаропрочных титановых сплавов марок ВТ6, ВТ8М-1 и ВТ25У, исследованных в данной работе, определены средние значения пределов выносливости на базах испытания 10^7 и $2 \cdot 10^7$ циклов для всех вариантов испытания, т. е. для образцов гладких и с надрезом при температуре испытания 20°C и при эксплуатационной температуре для каждого сплава.

Для титановых сплавов марок ВТ6, ВТ8М-1 и ВТ25У кривые усталости, соответствующие вероятности неразрушения 50%, приведены на рис. 15, средние значения пределов выносливости на базах испытания 10^7 и $2 \cdot 10^7$ циклов – в табл. 3.

Анализ результатов испытаний на МнЦУ исследованных титановых сплавов показал, что повышение температуры испытания оказывает различное влияние на величину предела выносливости. У сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 происходит снижение предела выносливости, которое составляет 24–35% в зависимости от условий испытаний. Эти сплавы при эксплуатационной температуре в отличие от комнатной имеют достаточно близкие значения пределов выносливости при испытании как гладких образцов, так и образцов с надрезом. Отметим также, что близкие

значения пределов выносливости имеют все исследованные сплавы при испытании образцов с надрезом в условиях эксплуатационной температуры на базе испытания $2 \cdot 10^7$ циклов и более высокой.

Таблица 3

Средние значения пределов выносливости на базах испытания 10^7 и $2 \cdot 10^7$ циклов титановых сплавов ВТ6, ВТ8М-1 и ВТ25У

Сплав	Температура испытания, °С	Форма образца	Средние значения пределов выносливости, МПа, на базе испытания, циклов	
			10^7	$2 \cdot 10^7$
ВТ6	20	Гладкий С надрезом K_σ	500 240 2,08	500 220 2,27
	350	Гладкий С надрезом K_σ	390 165 2,33	370 165 2,24
ВТ8М-1	20	Гладкий С надрезом K_σ	590 260 2,27	570 260 2,19
	450	Гладкий С надрезом K_σ	385 190 2,03	370 175 2,11
ВТ25У	20	Гладкий С надрезом K_σ	340 145 2,34	340 145 2,34
	550	Гладкий С надрезом K_σ	360 160 2,25	320 160 2,00

У сплава ВТ25У наблюдается неоднозначное изменение усталостной прочности при повышении температуры испытания. При испытаниях гладких образцов соотношение пределов выносливости зависит от базы испытания: на базе испытания 10^7 циклов более высокие значения предела выносливости – при температуре 550°C , а на базе $2 \cdot 10^7$ циклов – при температуре 20°C . При этом абсолютное изменение значений предела выносливости невелико и составляет 20 МПа, т. е. 6%. При испытании образцов с надрезом предел выносливости несколько выше при температуре 550°C , но также на небольшую величину 15 МПа. В целом можно сказать, что в пределах принятых баз испытаний повышение температуры испытания с 20 до 550°C не оказывает существенного влияния на величину предела выносливости сплава ВТ25У. Объяснение обнаруженного явления следует искать в воздействии циклического нагружения и температуры испытания на структуру сплава ВТ25У.

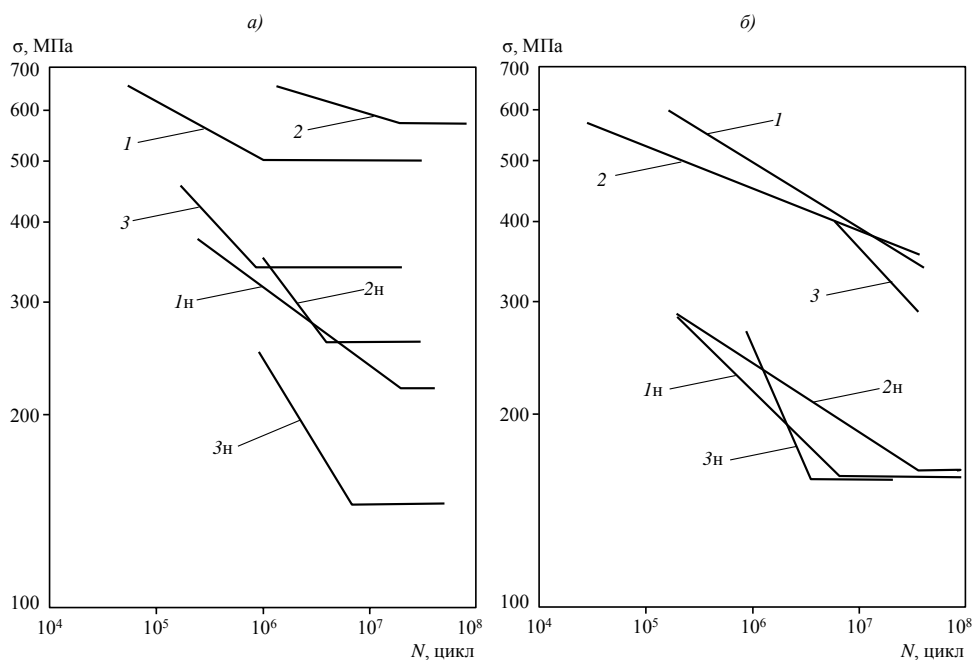


Рис. 15. Средние линии МнЦУ жаропрочных титановых сплавов при комнатной (а) и эксплуатационной температурах (б): 1 (1н), 2 (2н), 3 (3н) — гладкие образцы (образцы с надрезом) соответственно сплавов ВТ6 (350°С), ВТ8М-1 (450°С) и ВТ25У (550°С); в скобках указаны эксплуатационные температуры сплавов

Имеющиеся экспериментальные результаты позволяют оценить чувствительность названных титановых сплавов к концентрации напряжений в условиях многоциклового усталостного нагружения. Для оценки влияния концентрации напряжений на сопротивление МнЦУ титановых сплавов в данной работе применен эффективный коэффициент концентрации напряжений K_{σ} , который определяется как отношение предела выносливости образцов без концентрации напряжений к пределу выносливости образцов с концентрацией напряжений на заданной базе испытания. Коэффициент K_{σ} следует оценивать в связи со значением теоретического коэффициента концентрации напряжений α_{σ} , характеризующего надрез. В данной работе применен надрез, предусмотренный ГОСТ 25.502, для которого $\alpha_{\sigma} = 2,33$. Коэффициент K_{σ} принимает значения в интервале 2,00–2,33 (табл. 3), что указывает на достаточно высокую чувствительность к концентрации напряжений исследованных титановых сплавов. Отметим, что у сталей коэффициент K_{σ} часто принимает значения в интервале 1,50–1,90.

У жаропрочных металлических материалов повышение температуры испытания от комнатной до эксплуатационной часто вызывает изменение

формы кривой МнЦУ. Кривая усталости с наклонным левым и горизонтальным правым участками заменяется на один участок прямой, т. е. наблюдается линейная регрессия средних значений МнЦУ. У исследованных жаропрочных титановых сплавов описанное изменение наблюдается только при испытании гладких образцов. При испытании образцов с надрезом в условиях повышения температуры испытания форма кривой усталости с наклонным левым и горизонтальным правым участками сохраняется без изменения.

Обсуждение и заключения

На примере комплексных испытаний строительной балки, секции типовой вертикальной колонны и конструктивно-подобного образца верхней сварной гибридной панели крыла показано, что стенды и силовой пол ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова обладают уникальными возможностями для одновременного проведения натуральных механических и климатических испытаний крупногабаритных конструкций. При этом возможности испытательных стендов, расположенных на силовом полу ГЦКИ, могут быть существенно расширены за счет дополнительных приспособлений и оснастки, которые могут быть специально разработаны в зависимости от целей и для решения задач, поставленных перед исследователем [17].

Оценка жесткости всех испытанных элементов конструкций показала, что влияющих на несущую способность повреждений, вызванных силовым или климатическим воздействием, не выявлено. В конструкциях типовой вертикальной колонны, строительной балки и конструктивно-подобного образца сварной гибридной панели крыла при визуальном осмотре, а также при применении методов неразрушающего контроля значимых повреждений в процессе испытаний не выявлено, что подтвердило высокое качество элементов из металлических и полимерных композиционных материалов, а также обеспечение заданных при проектировании ресурсных и прочностных характеристик конструкций.

Оценка силовых характеристик конструктивно-подобного образца сварной гибридной панели крыла с углепластиковыми накладками, включая циклические испытания после экспозиции 4 мес, подтвердила высокое качество соединения «алюминий–углепластик», отсутствие контактной коррозии и динамики изменения механических свойств, что дает возможность его использования при проектировании конструкций, эксплуатирующихся в условиях умеренно теплого климата с мягкой зимой.

По результатам исследований характеристик МнЦУ жаро-прочных титановых сплавов можно сделать следующие выводы. Повышение температуры испытания с 20°С до эксплуатационной оказывает различное влияние на величину предела выносливости жаропрочных титановых сплавов.

У сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 происходит снижение пределов выносливости, которое составляет 24–35% в зависимости от условий испытаний. Повышение температуры испытания с 20 до 550°С вызывает у сплава ВТ25У неоднозначное изменение усталостной прочности. В целом существенного влияния на величину предела выносливости не наблюдается.

Жаропрочные титановые сплавы марок ВТ6, ВТ8М-1 и ВТ25У характеризуются достаточно высокой чувствительностью к концентрации напряжений [18]. Эффективный коэффициент концентрации напряжений изменяется в интервале $K_{\sigma}=2,00-2,33$ при значении теоретического коэффициента концентрации напряжений $\alpha_{\sigma}=2,33$.

Повышение температуры испытания с 20°С до эксплуатационной вызывает изменение формы кривой усталости только при испытании гладких образцов. При испытании образцов с надрезом в условиях повышения температуры испытания форма кривой усталости с наклонным левым и горизонтальным правым участками сохраняется без изменения.

Благодарности

Авторский коллектив выражает благодарность В.В. Автаеву, Н.Ю. Подживотову, А.В. Гладких за участие в работе над разделом, посвященным механическим испытаниям элементов конструкций на силовом полу ГЦКИ ВИАМ, а также М.А. Горбовцу, М.С. Беляеву, Т.И. Комаровой за участие в работе над разделом, посвященным исследованию характеристик многоциклового усталости жаропрочных титановых сплавов.

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. Колганов И.М., Дубровский П.В., Архипов А.Н. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2003. Ч. 1. 148 с.
3. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с наполнителем: справочник. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
4. Крысин В.Н., Крысин М.В. Технологические процессы формования, намотки и склеивания конструкций. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.
5. ГОСТ 9.906–87. Единая система защиты от коррозии и старения. Станции климатические испытательные. Общие требования. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 22 с.

6. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из псевдо- α -титанового сплава ВТ41 // Титан. 2016. №2. С. 33–42.
7. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Истракова А.Р., Калашников В.С. Повышение прочностных характеристик жаропрочных псевдо- α -титановых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2014. №55. С. 73–80. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-73-80.
8. Беляев М.С., Горбовец М.А., Кашапов О.С., Ходинев И.А. Механические свойства и структура титанового сплава ВТ41 // Цветные металлы. 2014. №8. С. 66–71.
9. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Истракова А.Р., Калашников В.С. Влияние содержания железа на механические свойства поковок из жаропрочного титанового сплава ВТ41 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №10. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-1-1.
10. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства жаропрочного титанового сплава для лопаток КВД // Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 8–14.
11. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник. Киев: Наукова думка, 1987. Ч. 1. 512 с.
12. Беляев М.С., Горбовец М.А., Комарова Т.И. Способ испытаний и расчетное определение предела выносливости для горизонтального участка кривой усталости // Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 50–55.
13. Nicholas T. High Cycle Fatigue. Ohio: Elsevier, 2006. 642 p.
14. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высшая школа, 1988. 240 с.
15. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // Авиационная промышленность. 2009. №4. С. 36–46.
16. Павлова Т.В., Кашапов О.С., Кондратьева А.Р., Калашников В.С. Возможности по расширению области применения сплава ВТ8-1 для дисков и рабочих колес компрессора // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №3. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.07.2016). DOI: 10/18577/2307-6046-2016-0-3-5-5.
17. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок // Крылья Родины. 2010. №4. С. 31–33.
18. Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №3. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.07.2015).