

УДК 620.178.35

*М.А. Горбовец¹, И.А. Ходинев¹, П.В. Рыжков¹***ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА МАЛОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ПРИ «ЖЕСТКОМ» ЦИКЛЕ НАГРУЖЕНИЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60

Материалы элементов конструкций авиационных газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации подвергаются большому спектру статических и динамических нагрузок в широком интервале рабочих температур и долговечностей. Для проведения расчетов на прочность основных деталей двигателя и подтверждения их ресурса необходимо располагать большой номенклатурой прочностных характеристик металлических материалов в условиях статического и циклического нагружения. В статье представлен обзор получения характеристик малоциклового усталости при «жестком» цикле нагружения, полученных на испытательных машинах фирмы Walter+Bai.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, испытательные машины, оборудование, циклические испытания, деформация, «жесткий» цикл.

*М.А. Gorbovets¹, I.A. Khodinev¹, P.V. Ryzhkov¹***EQUIPMENT FOR TESTING CARRYING OUT THE STRAIN-CONTROLLED LOW-CYCLE FATIGUE**

Materials of structural elements of aircraft gas turbine engines during operation are subjected to a wide range of static and dynamic loads in a wide range of operating temperatures and durability. Therefore, to calculate the strength of the main parts of the engine and confirm their service life, it is necessary to have a large range of strength characteristics of metal materials under static and cyclic loading. The paper presents an overview of the characteristics of the strain-controlled low-cycle fatigue, obtained on Walter+Bai machines.

Keywords: low-cycle fatigue, testing machines, equipment, fatigue testing, strain, strain, strain-controlled loading.

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

Темпы развития отечественного авиастроения напрямую зависят от разработки и внедрения новых материалов и технологий в производственный процесс. Реализация исследований научно-технического задела, определяющего облик газотурбинных двигателей (ГТД) шестого поколения, осуществляется объединениями (консорциумами) ведущих машиностроительных предприятий и научных центров, которые вписываются в программу шестого технологического уклада [1–4]. Особые требования к авиационной технике предъявляются в связи с экономической составляющей, так как помимо традиционных требований к конструкции и выбору материала по показателям прочности и надежности добавляются показатели, связанные со стоимостью изготовления и обслуживания такой техники. Стоимость обслуживания напрямую зависит от ресурса использования детали, что свидетельствует о необходимости существенно, а зачастую

и кратно, увеличивать ресурс по сравнению с базовыми моделями. Особое внимание уделяется доказательству соответствия нормам прочности материалов авиационных двигателей.

При внедрении новых материалов для авиационных двигателей необходимо выпустить специальный комплект документации о соответствии материала сертификационным требованиям, т. е. дать квалификацию материалу. При общей квалификации материала (паспортизации) проводят комплекс действий, посредством которых фиксируется состав материала, процессы его изготовления, свойства и характеристики, подтверждаемые в процессе приемо-сдаточных испытаний материала как объекта серийного производства. При специальной квалификации материала проводят комплекс действий, посредством которых определяется, что материал, примененный в типовой конструкции авиационного двигателя, обладает уровнем характеристик и статистическими параметрами распределения этих характеристик (выборочными средними значениями и дисперсиями), необходимыми для обеспечения летной годности двигателя в ожидаемых условиях эксплуатации. В частности, номенклатура прочностных характеристик металлических материалов, необходимых для паспортизации и квалификации основных деталей авиадвигателя, включает: характеристики кратковременной прочности и пластичности, длительной прочности и ползучести, малоцикловой (МЦУ) и многоцикловой усталости (МнЦУ), характеристики скорости роста трещины усталости (СРТУ).

Все эти характеристики определяются в соответствии со стандартами – отечественными (ГОСТ и ОСТ), зарубежными (ASTM, DIN и BS) и международными (ISO). Сравнение отечественных и зарубежных материалов по величине расчетных значений будет правомерно только в том случае, если эквивалентны не только методики расчета, но и методики испытаний [5, 6].

В настоящее время уровень свойств материалов, используемых в авиационной технике, резко возрос, в связи с чем совершенствование экспериментальной техники и использование современных испытательных машин при квалификации материалов приобретает особую актуальность [7–11]. Разработкой испытательной техники для определения механических свойств, которые используются в области исследований и создания новых материалов занимается ряд крупнейших предприятий.

Современные испытательные машины изготавливают в соответствии с высокими требованиями стандартов на методы механических испытаний. Универсальность сервогидравлического оборудования дает возможность многим производителям делать свои машины многозадачными и реализовывать на одной единице оборудования сразу несколько видов испытаний, таких как МнЦУ при одноосном растяжении-сжатии, МЦУ при «мягком» и «жестком» циклах нагружения, определение СРТУ [11–14]. Такой подход приветствуется потребителями, так как представляет экономическую выгоду.

В данной статье представлены обзор состава испытательных машин сервогидравлического типа различных производителей, а также описание метода проведения испытаний на МЦУ при «жестком» цикле нагружения с получением ряда важных характеристик прочности. Испытания на МЦУ при заданной деформации в определенной степени моделирует эксплуатационное нагружение, при котором возникают малые пластические деформации, а число циклов нагружения составляет $10^4 \div 10^5$ цикл. Такие условия реализуются, в частности, в деталях ротора авиационных ГТД при воздействии высоких температур [15].

Малоцикловая усталость является одной из основных характеристик прочности для жаропрочных материалов. При исследовании и определении характеристик МЦУ необходимо соблюдение требований нормативно-технической документации к процедуре проведения испытаний. Работа выполнена в рамках реализации комплексной

научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [4].

Материалы и методы

Определение параметров основных типов критериев и моделей усталостного разрушения, позволяющих оценить число циклов до разрушения образца материала по напряженному или деформированному состоянию, является непростой экспериментальной задачей и предъявляет к испытательному оборудованию ряд требований. Для проведения испытаний на МЦУ принято использовать испытательные машины сервогидравлического типа. Электромеханические испытательные машины в основном предназначены для проведения статических испытаний ввиду своих конструктивных особенностей.

Оценка качества систем исследования механических свойств материалов возможна по трем независимым параметрам: по точности измерения и управления режимами испытательных средств; по степени автоматизации исследования; по уровню математического обеспечения экспериментов, тогда оценка качества испытательной системы может быть описана соотношением [16]:

$$D = \left[\left(\sum_{i=1}^n \sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2 + \gamma_i^2} \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^m \sqrt{\mu_j^2 + \eta_j^2 + \delta_j^2} \right)^2 \right]^{1/2},$$

где n и m – количество оцениваемых управляемых и измеренных параметров соответственно; α и μ – оценки точности управления и измерения; β и η – оценка степени автоматизации систем; γ и δ – оценка уровня математического обеспечения в системах испытательного воздействия и отклика информации.

Для сервогидравлических испытательных машин некоторых ведущих фирм в таблице приведены оценки качества, которые выставлены по пятибалльной системе в соответствии с сопоставлением технических характеристик машин и требований стандартов, а также по критерию технических особенностей отдельных функциональных узлов испытательных машин.

Оценка некоторых сервогидравлических испытательных систем*

Тип прибора сервогидравлической машины	m	n	α	μ	β	η	γ	δ	D
Фирма Walter+Bai									
LFV	$P, \sigma, \varepsilon, N, \omega$	$P, \sigma, \varepsilon, N$	5	5	4	4	4	4	22,6495
Фирма MTS									
MTS Landmark	$P, \sigma, \varepsilon, N, \omega$	$P, \sigma, \varepsilon, N$	5	5	5	5	5	5	25,98076
Фирма Instron									
8801	$P, \sigma, \varepsilon, N, \omega$	$P, \sigma, \varepsilon, N$	5	5	4	4	4	4	22,6495
Фирма Shenck									
Schenck Hydropuls PSB-25	P, σ, N, ω	P, σ, N	4	4	3	3	3	3	15,42725

* P – датчик силы; σ – датчик напряжения; ε – датчик деформации; N – автоматический счетчик циклов; ω – канал формы цикла нагружения.

Несмотря на высокую точность управления и измерения оборудования фирм Walter+Bai и Instron, фирма MTS имеет преимущество по степени автоматизации и обеспечивает полный контроль над системой, включая создание формы сигнала, калибровку, установку ограничений и отслеживание статуса испытаний, а также интуитивно понятный интерфейс создания и снятия данных по данным испытания. Для более

сложных экспериментов на МЦУ с переменными значениями цикла фирма Instron предлагает дополнительную программу, что также является преимуществом. Все перечисленные испытательные системы соответствуют уровню требуемой точности, предъявляемому в стандартах, однако при выборе данного оборудования дополнительным преимуществом будет качество сервисного обслуживания и доступность взаимозаменяемых комплектующих.

В лаборатории прочности и надежности материалов авиационных двигателей и силовых энергетических установок установлено сервогидравлическое универсальное испытательное оборудование серии LFV-100 фирмы Walter+Bai, предназначенное для проведения различных циклических испытаний образцов из металлов и сплавов при комнатной и повышенных температурах в интервале 20–1200°C (рис. 1). Максимальное значение нагрузки в статическом режиме составляет ± 100 кН, максимальная амплитуда по нагрузке в циклическом режиме ± 80 кН. Проведение испытаний на МнЦУ, МЦУ и СРТУ на одном типе испытательных машин реализуется за счет быстрой смены оснастки, возможности изменения производительности (уменьшение и увеличение частоты циклирования), наличия нескольких программных пакетов для проведения испытаний. Далее приведено подробное описание оснащения испытательных машин данного типа.



Рис. 1. Универсальные сервогидравлические испытательные машины для проведения циклических испытаний

В этих машинах предусмотрены измерители деформации разных типов – экстензометры, представляющие собой датчик с керамическими стержнями, которые перед началом проведения испытаний крепятся непосредственно на образец, что позволяет замерять деформацию рабочей части образца как при комнатной, так и при повышенных температурах. При проведении испытаний на МЦУ при «жестком» цикле нагружения у металлических жаропрочных материалов предельное значение размаха деформации не превышает $\pm 2\%$, поэтому использование экстензометров с измерительной базой 12,5 мм и диапазоном измерения $\pm 1,25$ мм ($\pm 10\%$) является целесообразным по критерию разрешительной способности датчика. По методике теста такой датчик относится к динамическим (растяжение–сжатие) в противоположность монотонным, которые измеряют одностороннюю деформацию.

Данные машины также могут быть оснащены несколькими типами разъемных электропечей, обеспечивающих нагрев образцов из металлических жаропрочных материалов до максимальных рабочих температур (до 1200°C): с одной и тремя зонами нагрева, что способствует плавному равномерному распределению температурного поля. Трехзонная печь сконструирована определенным образом для установки измерительного экстензометра на рабочей части образца при проведении высокотемпературных испытаний. Для контроля температуры в зоне испытания возможно использовать термопары В, N и S типов, однако предпочтение отдается термопарам N типа, что связано с точностью показаний в заданном диапазоне температур, достаточной долговечностью и низкой стоимостью (по сравнению с термопарами В и S типов).

Для обеспечения точности прикладываемой осевой нагрузки при испытаниях на МЦУ, в том числе высокотемпературных, при «жестком» цикле нагружения применяют захваты с гидравлическим поджатием (рис. 2), изготовленные из жаропрочного никелевого сплава, сохраняющего свои прочностные характеристики на достаточно высоком уровне при температуре эксплуатации до 1200°C . Экраны круглого сечения, изготовленные из нержавеющей стали, минимизируют теплопередачу. Взаимозаменяемость захватных частей и адаптеров позволяет испытывать образцы различных типов. В оснастке этой конструкции можно реализовать симметричное и асимметричное нагружения благодаря надежной фиксации образца с возможностью регулировки давления зажатия. Расчет давления зажатия производится на основании прикладываемой к образцу нагрузки в процессе испытания, в особенности точный расчет давления зажатия важен для проведения высокотемпературных испытаний с переходом через значение 0 нагрузки (симметричный цикл нагружения) – для исключения люфта резьбовой части образца в оснастке.



Рис. 2. Захваты для высокотемпературных испытаний на малоцикловую усталость при «мягком» и «жестком» циклах нагружения, изготовленные из жаропрочных никелевых сплавов

Испытательные машины должны обеспечивать высокую точность соосности, которая выражается в совпадении осей захватов машины и зафиксированного в них образца. Технические требования к проведению испытаний устанавливают допускаемые отклонения, которые необходимо выдерживать при проведении испытаний, – иначе в образце возникают изгибные напряжения, значительным образом снижающие характеристики усталостной долговечности, создавая при этом большой разброс результатов. В испытательных машинах перед началом испытания должна проводиться юстировка (выравнивание соосности). Блок юстировки, как правило, является частью силового контура и расположен между верхним захватом и траверсой. Этот блок отвечает за обе настройки соосности – концентрическую и угловую при предварительном нагружении (рис. 3).

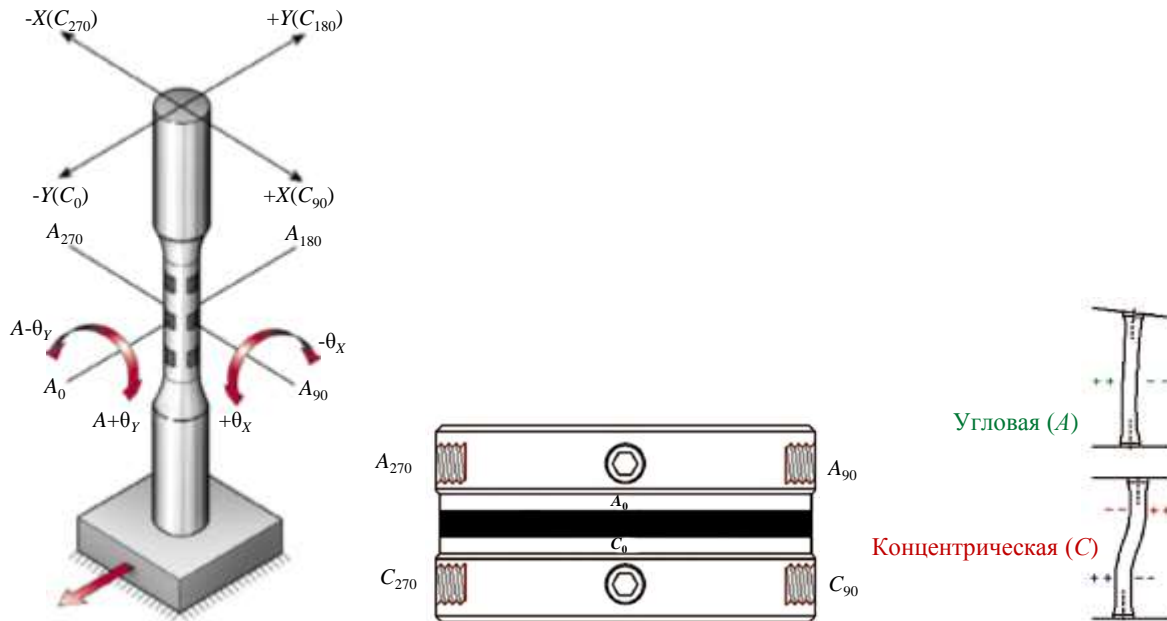


Рис. 3. Настройка соосности – юстировка

Уменьшение времени и простота настройки соосности являются одним из примеров повышения требований, предъявляемых к испытаниям, что указано в стандарте ASTM E606. Регулировка координатных осей позволяет проводить испытания, отвечающие требованиям стандарта ASTM E1012 «Практика для проверки силовой рамы и выравнивания образцов при прикладываемой осевой растягивающей или сжимающей силы». Для наглядного представления на рис. 4 приведены две цепочки нагружения с настроенной соосностью и без настройки соосности.

Большое внимание уделяется изготовлению образца. Так, для испытаний при «жестком» цикле нагружения в основном используются цилиндрические образцы, соответствующие требованиям ASTM E606. В частности, особые требования предъявляются к длине рабочей части, которая должна обеспечивать устойчивость образца к потере соосности при испытаниях, а также плавному радиусу перехода от рабочей части к захватной для обеспечения меньшей концентрации напряжений в этой зоне, что, в свою очередь, обеспечивает разрушение образца в рабочей части. На рис. 5 представлен нагруженный образец, где видно как распределяются напряжения по телу образца. В требованиях указано также на необходимость продольного полирования рабочей части образца (это относится к последней стадии изготовления образца) для получения минимальных остаточных напряжений. Отмечено, что на рабочей части не должно

оставаться поперечных рисок при увеличении $\times 20$. Зарождение трещины во всех случаях начинается с поверхности образца, отчетливо наблюдаются очаг, зона усталостного развития трещины и доллом.



Рис. 4. Сравнение режимов отстройки

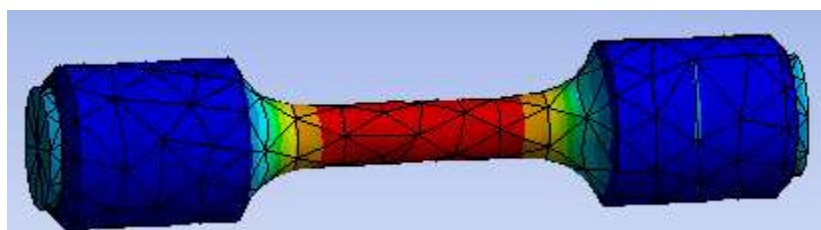


Рис. 5. Цилиндрический образец для испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения

Программное обеспечение испытательного комплекса должно позволять записывать значения регистрируемых параметров в различные типы файлов с кодировкой ASCII для их дальнейшего конвертирования и хранения на электронных носителях. Файлы с кодировкой ASCII занимают достаточно небольшой объем, несмотря на содержание в них большого количества информации.

Результаты и обсуждение

Надежность работы авиационного двигателя определяют четыре основные группы деталей: роторные детали и диски, лопатки, валы, корпусные детали. Поскольку реальные эксплуатационные полетные циклы сложны по форме и носят вероятностный характер, то для оценки исчерпания долговечности по МЦУ их схематизируют на базе статистики эксплуатации и устанавливают так называемый обобщенный полетный цикл, а затем заменяют его на элементарные подциклы, тем самым имитируя последовательность режимов: взлет–набор высоты–посадка–реверс.

Суть метода испытаний на МЦУ при «жестком» цикле нагружения заключается в контроле деформации рабочей части образца, исключая влияние всей цепочки нагружения.

Образцы испытывают по схеме одноосного нагружения с заданием ряда характеристик нагружения: закон изменения значений деформаций (форма цикла нагружения), частота, коэффициент асимметрии цикла и амплитудные значения деформации. В результате проведения испытания цифровая управляющая система с программным обеспечением и последовательным интерфейсом подключения датчиков управления испытательной машины позволяет получить ряд важных характеристик прочности: число циклов до разрушения, среднее значение модуля упругости при растяжении, значения напряжений для каждого цикла нагружения.

Совокупность этих характеристик невозможно было бы получить во время проведения испытаний на МЦУ при «мягком» цикле нагружения, где контролирующим параметром является напряжение. В этом заключается преимущество метода испытаний на МЦУ при «жестком» цикле нагружения. Исследование этих характеристик представляет практический интерес. Регистрация значений напряжений (рис. 6) позволяет наблюдать за изменением напряжений в ходе испытания, эти изменения можно интерпретировать как изменения структуры сплава совместно с инициацией роста трещин. Так, при возрастании/убывании значений напряжений на кривых циклического упрочнения/разупрочнения происходит перераспределение подводимой энергии деформирования, которое можно объяснить нарушением сплошности материала, образованием пор и прочих дефектов. Резкие обрывы кривой характеризуют «сброс» некоторого критического значения приложенной нагрузки в объеме материала, который может проявиться в виде образования новой поверхности (очага усталостного разрушения).

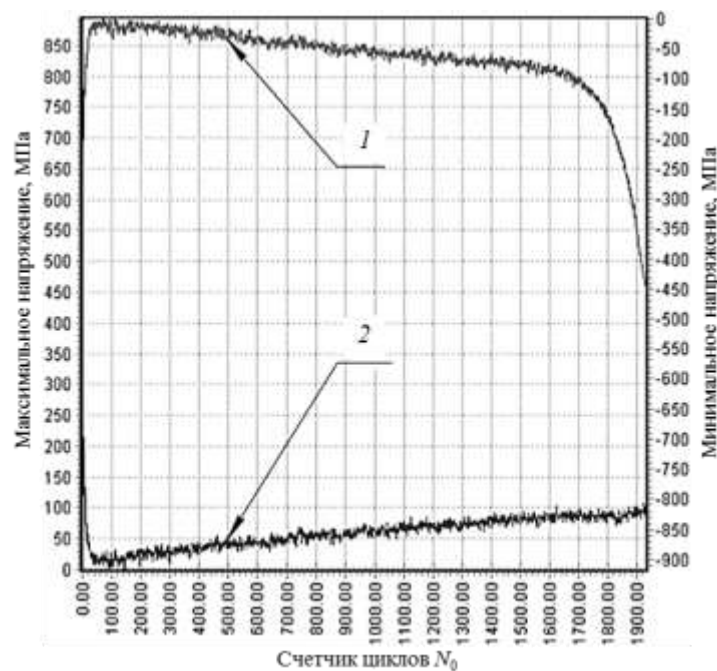


Рис. 6. Диаграмма изменения максимальных (1) и минимальных напряжений (2)

Другим параметром циклического упруго-пластического деформирования является ширина петли гистерезиса (рис. 7), которая характеризует величину накопленной в материале необратимой деформации ϵ_n . Анализ зависимости площади петли гистерезиса от значения амплитуды деформации, асимметрии нагружения, числа циклов, состояния материала, температуры и других факторов позволяет глубже понять механизм усталостного разрушения.

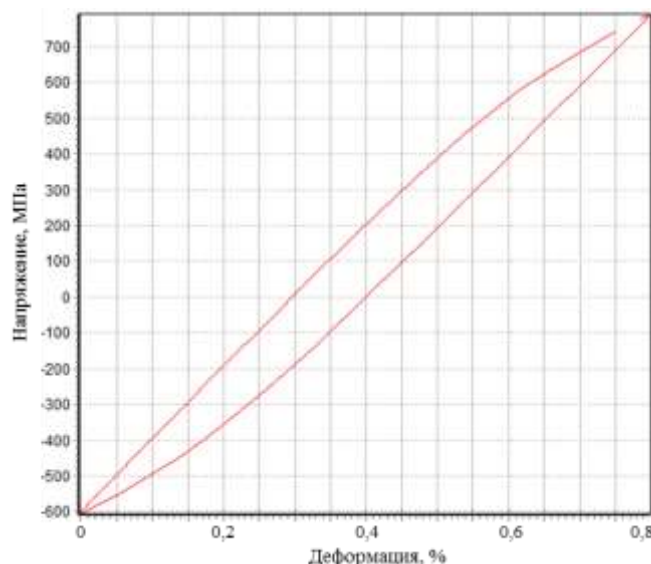


Рис. 7. Петля гистерезиса при асимметричном цикле нагружения

Заключения

Возможности испытательной машины фирмы Walter+Bai в области проведения циклических испытаний раскрывают широкий потенциал в области исследований усталостной прочности при комнатной и эксплуатационной температурах. В работе испытательных машин отмечена высокая точность поддержания соосности оснастки и удобства ее настройки. Отработка заданий по каналам измерительных датчиков производится с относительной погрешностью, соответствующей требованиям, предъявляемым как в отечественном стандарте ГОСТ 25.502, так и в требованиях зарубежных стандартов ISO и ASTM.

Применение испытательных машин фирмы Walter+Bai после переоснащения лаборатории прочности и надежности материалов авиационных двигателей и силовых энергетических установок оптимизировало решение задач по определению циклической прочности высокотехнологичных материалов, применяемых в современных ГТД и ГТУ, с соблюдением всех необходимых отечественных и зарубежных стандартов и специальных требований. Получение характеристик в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным, невозможно без использования оборудования, которое всегда работоспособно и поддерживает воспроизводимость результатов испытания материалов на должном техническом уровне.

Отдельно следует упомянуть про неточные данные эксперимента. Любое число, которое получается при эксперименте, – это результат измерения. Источником погрешностей часто является ненадлежащий контроль калибровки и сервисного обслуживания испытательного оборудования. Лучше не иметь никаких данных, чем получить ошибочную информацию с различных датчиков, которая вводит в заблуждение разработчиков сплавов и специалистов, непосредственно проводящих испытания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Что такое инновации // Наука и жизнь. 2011. №11. С. 16–21.
2. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели: информ. бюл. 2014. №S. С. 43–47.
3. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информац. матер. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.

4. 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.
5. Reed R.C. *The Superalloys. Fundamentals and Applications*. Cambridge: United Kingdom at University Press, 2006. 372 p.
6. 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: 04.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-11-11.
7. Каблов Е.Н., Гриневич А.В., Ерасов В.С. Характеристики прочности металлических авиационных материалов и их расчетные значения // *75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2007: юбил. науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 370–379.*
8. Горбовец М.А., Беляев М.С., Ходинев И.А., Лукьянова М.И. Исследование МЦУ жаропрочных сплавов при «жестком» цикле нагружения // *Цветные металлы*. 2017. №2. С. 91–95.
9. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Летников М.Н., Мазалов И.С. Применение новых деформируемых никелевых сплавов для перспективных газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.
10. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2013. №3. С. 47–54.
11. Евгенов А.Г., Горбовец М.А., Прагер С.М. Структура и механические свойства жаропрочных сплавов ВЖ159 и ЭП648, полученных методом селективного лазерного сплавления // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №S1 (43). С. 8–15. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-8-15.
12. Геров М.В., Владиславская Е.Ю., Терентьев В.Ф. и др. Исследование усталостной прочности сплава Ti–6Al–4V, полученного методом селективного лазерного плавления // *Деформация и разрушение материалов*. 2016. №5. С. 14–20.
13. Луценко А.Н., Перов Н.С., Чабина Е.Б. Новые этапы развития Испытательного центра // *Авиационные материалы и технологии* 2017. №S. С. 460–468. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-460-468.
14. 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 // *Материаловедение*. 2017. №1. С. 41–48.
15. Луценко А.Н., Славин А.В., Ерасов В.С., Хвацкий К.К. Прочностные испытания и исследования авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
16. Гришко В.Г., Алексюк М.М., Мелентьева В.Б. Методика оценки качества автоматизированных систем исследования механических свойств материалов и элементов конструкций // *Проблемы прочности*. 1978. №2. С. 119–122.