

УДК 620.1+621.431.75

ТРЕБОВАНИЯ К ПОРЯДКУ И ПРОЦЕДУРАМ ОЦЕНКИ РАСЧЁТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ОСНОВНЫХ И ОСОБО ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ СЕРТИФИКАЦИИ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2015 Ю. А. Ножницкий¹, Е. Б. Качанов², Е. Р. Голубовский¹, В. К. Куевда³¹Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва²Сертификационный центр «МАТЕРИАЛ», г. Москва³Авиационный регистр МАК, г. Москва

Рассмотрены требования нормативных технических документов, предъявляемые при сертификации авиационных двигателей к порядку и процедурам оценки используемых при подтверждении прочности и ресурса основных и особо ответственных деталей, характеристик конструкционной (реализуемой в конструкции) прочности металлических сплавов. Описано содержание работ, выполняемых для подтверждения указанных требований разработчиком авиационного двигателя, разработчиком материала/полуфабриката и производителем двигателя. Рассмотрены задачи, решаемые на этапах общей и специальной квалификации материалов. Представлена номенклатура основных определяемых при квалификации сплавов, в том числе монокристаллических, механических характеристик. Указаны стандарты, в соответствии с которыми должны проводиться испытания. Приведены соотношения, необходимые для определения значений используемых при оценке прочности и долговечности деталей характеристик. Рассмотрены требования к статистической обработке результатов исследований конструкционной прочности сплавов и требования к установлению гарантированных при поставке материалов/полуфабрикатов значений механических свойств. Отмечена необходимость данных о возможном содержании в заготовках основных (критических по последствиям разрушения) деталей дефектов различных размеров. В библиографический список включены основные нормативные технические документы, выполнение требований которых необходимо при проведении специальной квалификации сплавов, применяемых для изготовления основных и ответственных деталей авиационных двигателей.

Сертификация производителя материала/полуфабриката, аттестация и аккредитация испытательных лабораторий, квалификация материала/полуфабриката, характеристики конструкционной прочности.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-37-48

Для обеспечения конкурентоспособности на мировом рынке авиационные газотурбинные двигатели (АГТД) должны обладать высокой прочностной надёжностью. Поэтому для изготовления деталей и узлов этих двигателей могут применяться только тщательно исследованные конструкционные материалы. Для оценки прочности и подтверждения ресурса деталей авиационных двигателей должны использоваться статистически обоснованные минимальные значения прочностных характеристик, а при производстве должен быть исключён пропуск деталей Б, изготовленных из материала с пониженными прочностными характеристиками.

При сертификации авиационных двигателей (АД), для получения сертификата типа, разработчику АД необходимо располагать доказательной документацией (в т.ч. относительно выбора металлического материала/полуфабриката (МП) для основных и особо ответственных деталей, определения расчётных значений характеристик конструкционной прочности, соответствия их требованиям «Авиационных правил» и «Норм прочности»). Содержание этой части доказательной документации определяется требованиями нормативных документов, разработанных специалистами Авиационного регистра Межгосударственного авиационного комитета (АР МАК), ФГУП «ЦИАМ им.

П.И. Баранова», Сертификационными центрами СЦ «Материал» и ЦС «Качество» [1-4].

Одним из первоочередных условий, которые определяют требования к МП для основных и особо ответственных деталей, является необходимость для предприятия-производителя МП иметь сертификат АР МАК на право производства этого МП.

Выбор поставщика МП является прерогативой разработчика авиационной техники. Основополагающими критериями выбора (кроме физико-механических характеристик) являются качество, цена продукции, репутация предприятия поставщика.

Качество в данном случае обозначает, что процесс управления производством МП на предприятии ведётся в соответствии со стандартами серии ГОСТ ИСО 9000, МП имеет комплекс свойств, соответствующих нормативной и технической документации (ТУ, стандартов), а процесс производства материала и его свойства стабильны.

На основании требований федерального закона № 184-ФЗ «О техническом регулировании в РФ» и требований «Авиационных правил» (АП) АР МАК ввёл в действие «Руководства» [5-8], определяющие условия, соблюдение которых обязательно при производстве МП для авиационной техники. В соответствии с «Руководствами» [5-8], качество материалов определяется и подтверждается в процессе обязательной сертификации предприятия-производителя.

Сертификация предприятия-производителя осуществляется Комиссией АР МАК, которая состоит из экспертов и экспертов-аудиторов и формируется совместно Сертификационным центром «Материал» и соответствующим отделом АР МАК. По результатам сертификационного обследования Комиссия составляет заключение, на основании которого АРМАК принимает решение о сертификации организации - производителя. Эта организация в случае соблюдения всех нормативных и технических требований,

изложенных в Руководствах [5-8], получает «Сертификат на производство авиационных материалов» сроком на три года, с обязательным ежегодным инспекционным контролем Комиссией АР МАК. В приложении к «Сертификату...» указана область аккредитации с перечнем МП, разрешённых к производству.

Одним из основных условий получения организацией «Сертификата на производство авиационных материалов» является выполнение требований стандартов серии ГОСТ ISO 9000 (Руководство [5]). Эта серия стандартов создана на основе анализа деятельности успешных мировых производителей различных товаров и услуг. Стандарты систематизируют подходы к эффективному управлению организацией, обеспечению контроля процесса производства, контроля жизненного цикла производимой продукции. Требования стандартов распространяются на все организации независимо от их численного состава и объёмов производимой продукции.

Предлагая общие принципы управления организацией и производством продукции, стандарты не формализуют процесс управления и не ограничивают руководство в создании собственных схем, наиболее подходящих к конкретному производству. Особенно важно соблюдение требований стандартов серии ГОСТ ISO 9000 в условиях многопрофильного малотоннажного производства материалов, когда руководство организации должно руководить многочисленными процессами постоянно изменяющегося производственного цикла. Основные несоответствия, выявляемые в процессе обследований, связаны с формализацией требований стандарта к управлению документацией, невнимательностью персонала.

В условиях многопрофильного металлургического производства количество выявляемых несоответствий зависит от многих причин. Выявляемые проблемы связаны с объёмом и периодичностью выполняемых заказов, подготовкой и квали-

фикацией персонала, состоянием основного оборудования, аудитом поставщиков необходимых шихтовых и технологических материалов, их постоянством и правилами замены поставщиков. Несоответствия, выявляемые при обследовании [6], приводят к появлению внутреннего брака в цехах, возврату несоответствующей продукции, снижению доверия у потребителей. Большая часть несоответствий может быть устранена при соблюдении требований к ведению и состоянию документации, повышении ответственности и компетентности персонала, вовлечении его в деятельность по управлению качеством выполняемых работ и изготавливаемой продукции. Этому же содействует составление планов развития производства, улучшений условий труда, своевременное неформальное обучение персонала.

Важным моментом, определяющим качество продукции, является процесс отбора поставщиков шихтовых и технологических материалов. Требования к обязательному аудиту действуют в отношении любых фирм, поставляющих необходимые для производства материалы. Необходимо отметить важность входного контроля покупаемых материалов.

Анализ стабильности свойств материалов и полуфабрикатов [7] является важнейшим элементом оценки работы производства и демонстрации потребителям своих возможностей. Оценка стабильности проводится с применением статистических критериев характеристик продукции в соответствии с ГОСТ 50779.44-2001 «Показатели возможностей процессов. Основные методы расчётов». Определяемые статистические критерии [7], которые вычисляются методами обработки результатов контрольных испытаний готовой продукции, характеризуют качество продукции, стабильность технологии и производства в целом, и, в итоге, надёжность применения МП в авиационных конструкциях.

Следует отметить, что выявляемая статистическими методами нестабильность не является свидетельством произ-

водства продукции, не соответствующей ГОСТ или ТУ, а указывает на необходимость проведения анализа и принятия решений о корректирующих мероприятиях в соответствующих технологических процессах, о качестве используемых технологических материалов, состоянии оборудования, правильности проводимых сдаточных (контрольных) испытаний. Так, например, пониженные значения статистического параметра $P_{pk} (P_p) < 0,67$ [8] могут показывать, что в этом случае отмечаются повышенные значения разброса контролируемых характеристик материала (в пределах допускаемых ТУ), а процесс его производства при этом определяется как нестабильный, неконтролируемый и неуправляемый.

Оценка стабильности свойств продукции и её качества проводится на основе контрольных и сдаточных испытаний, проводимых аттестованными для этих целей заводскими лабораториями. Обеспечение качества контрольных испытаний зависит от соблюдения требований стандартов [8] методических руководств, требований к продукции, указанных в ТУ, наличия стандартных образцов и эталонов для анализа химического состава, обеспечения необходимым оборудованием, проведения метрологического контроля. Важным фактором является также профессиональная подготовка сотрудников лабораторий.

Детальный анализ типичных несоответствий, выявляемых при сертификационном обследовании предприятий - производителей МП (на основе опыта последних десяти лет), изложен в [9].

Для определения численных значений характеристик конструкционной прочности МП, выбранных разработчиком двигателя для изготовления основных и особо ответственных деталей, используются МП, произведённые на предприятии, имеющем сертификат АР МАК. Эти характеристики определяются в рамках общей и специальной квалификации МП на основании результатов испытаний и исследований образцов из указанных МП

в соответствии с положениями «Руководства» [3].

«Руководство» [3] определяет порядок проведения и контроля оценки соответствия МП, используемых в конструкции авиационного двигателя, требованиям «Авиационных правил (АП)» (АП-21, АП-33, АП-ВД) и «Норм прочности авиационных газотурбинных двигателей гражданской авиации». Его действие распространяется:

- на МП, предполагаемые для использования в конструкциях авиационных двигателей, заявки на сертификацию типа, которые поданы после введения в действие настоящего «Руководства»;
- на МП, которые предполагается использовать при внесении изменений в типовую конструкцию ранее сертифицированных двигателей после введения в действие настоящего «Руководства».

Требования «Руководства» должны быть выполнены для каждого поставщика МП, в том числе при смене поставщика.

Особое внимание должно быть уделено исследованию МП поставщиков, ранее не выпускавших такие МП.

Объём применения положений «Руководства» [3] к МП конструкции авиационного двигателя, находящегося в стадии сертификации типа на момент введения в действие «Руководства», а также к МП, используемым в конструкции авиационного двигателя, на который выдан Сертификат типа, определяется отдельным решением АР МАК при наличии соответствующих обоснований, представленных разработчиком двигателя.

Испытания и исследования образцов при общей и специальной квалификации МП должны быть проведены в Испытательных центрах (ИЦ) и/или Испытательных лабораториях (ИЛ), аттестованных и аккредитованных АР МАК (система сертификации АТ и ОГА) и Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (система сертификации ГОСТ Р). Требования, которым должны удовлетворять ИЦ (ИЛ), изложены в нормативных документах [10, 11]. Степень

соответствия ИЦ (ИЛ) этим требованиям определяет Комиссия АР МАК совместно с представителями Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии на основании детального сертификационного обследования. В случае положительных результатов обследования и соответствующего заключения Комиссии принимается решение АР МАК об аккредитации ИЦ (ИЛ), на основании которого выдаётся соответствующий АТТЕСТАТ АККРЕДИТАЦИИ ИЛ (ИЦ) о технической компетентности в установленной области аккредитации. Срок действия аттестата устанавливается на 3-5 лет с ежегодным инспекционным контролем Комиссией АР МАК уровня технической компетентности ИЛ (ИЦ). В настоящее время в авиационном двигателестроении РФ аккредитованы четыре испытательные лаборатории – ИЛ «ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова», ИЦ «ВИАМ», ИЛ ОАО «АВИАДВИГАТЕЛЬ», ИЦ ОАО «ВИЛС».

При общей квалификации [3], которая выполняется разработчиком МП совместно с его производителем, определяются средние значения и оценки дисперсии физико-механических характеристик, необходимых при проектировании и определении ресурсных параметров основной или особо ответственной детали. Эти значения должны быть получены на основании статистической обработки выборок результатов испытаний и исследований образцов, изготовленных из материала/полуфабриката промышленного (опытно - промышленного) производства. Результатом общей квалификации МП является разработка паспорта и редакции технических условий (ТУ) на поставку МП. Многолетний опыт применения в авиационном двигателестроении данных из паспортов авиационных материалов свидетельствует о том, что в паспорт должны быть включены следующие данные о физико-механических свойствах МП:

- химический состав сплава, вид полуфабриката, способ изготовления полуфабриката, область применения полуфабриката с указанием предельных рабочих

температур, режим термообработки полуфабриката, требования к контролю полуфабриката;

- физические характеристики для всего интервала рабочих температур (плотность ρ , кг/м³; коэффициент теплопроводности λ , Вт·м⁻¹·К⁻¹; удельная теплоёмкость C_p , кДж·кг⁻¹·К⁻¹; коэффициент термического линейного расширения α , К⁻¹);

- механические характеристики для всего интервала рабочих температур (модуль Юнга E , ГПа; предел прочности σ_B , МПа; предел текучести $\sigma_{0.2}$, МПа; удлинение δ , %; сужение Ψ , %; пределы длительной прочности σ_{τ} , МПа для долговечностей 100, 500, 1000 ч; прочностной коэффициент K'_σ , характеризующий чувствительность сплава к концентрации напряжений при испытаниях на длительную прочность [12-27]; пределы ползучести $\sigma_{\varepsilon/\tau}$, МПа для долговечностей 100, 500 и 1000 ч; предельные значения напряжений многоциклового усталости - $\sigma_{MЦУ}$ на базах $N=(1\div 2)\cdot 10^7$ циклов для гладких образцов и образцов с концентратором напряжений; предельные значения размаха деформаций малоциклового усталости $\Delta\varepsilon_{MЦУ}$ (или напряжений $\Delta\sigma_{MЦУ}$) на базах $N=(1\div 5)\cdot 10^4$ циклов; значения параметров скорости роста трещины усталости на стадии устойчивого роста и границы интервала этой стадии);

- коррозионная стойкость и методы защиты от коррозии (общая коррозионная стойкость в общеклиматических условиях [13], склонность к межкристаллитной коррозии [14], сопротивление газовой коррозии с показателем жаростойкости – по убыли веса и глубине повреждённого слоя; методы защиты от коррозии основного материала и сварных и паяных соединений);

- технологические свойства (обрабатываемость при механической обработке полуфабриката; методы сварки и пайки, присадочные материалы, режимы сварки и пайки, технологические ограничения);

- рекомендованный режим ТУ на поставку МП (в т.ч. режимы контрольных испытаний).

Специальная квалификация МП [3] осуществляется по результатам испытаний образцов аккредитованными ИЛ (ИЦ) разработчиком АД совместно с разработчиком МП и предприятием-изготовителем. При проведении специальной квалификации для исследований конструкционной (реализуемой в конструкции в ожидаемых условиях эксплуатации) прочности испытываются образцы, вырезаемые из заготовок деталей или окончательно изготовленных деталей прежде всего в процессе так называемых всесторонних исследований характеристик материала детали. Режимы испытаний выбираются с учётом ожидаемых условий эксплуатации деталей. В рамках специальной квалификации формируются выборки результатов испытаний образцов, на основе которых определяются расчётные значения характеристик конструкционной прочности МП для диапазона рабочих температур данной детали [4]. Следует отметить, что при условии сертификации двигателя за рубежом испытания образцов должны быть проведены в соответствии с требованиями отечественных и зарубежных стандартов на методы испытаний:

- на кратковременную прочность и пластичность [15-18] (с определением характеристик упругости - модуля E , напряжений σ_B , $\sigma_{0.2}$, пластичности δ , Ψ и диаграмм растяжения);

- длительную прочность (ДП) гладких образцов и образцов с надрезом и на ползучесть [19-21] с определением пределов σ_{τ} , $\sigma_{\varepsilon/\tau}$, кривых длительной прочности и ползучести в графической и аналитической форме с использованием соотношений:

$$\tau_p = F_1(T, \sigma) \text{ или } \sigma_{\tau} = F_{11}(PLM), \quad (1)$$

где $PLM = T(C + \log \tau_p)$ – параметр Ларсона-Миллера;

$$\tau_{\varepsilon} = F_2(T, \sigma, \varepsilon); \quad (2)$$

• малоцикловую усталость (МЦУ) [22, 23, 25] при «жёстком» осевом нагружении с определением предельных значений размаха деформации $\Delta\varepsilon_N$ и/или амплитуды деформации ε_a на базах не менее $N \geq 5 \cdot 10^4$ циклов, кривых МЦУ в графической и аналитической форме для коэффициентов асимметрии цикла $R_\varepsilon = -1, 0, 0.5$ и, при необходимости, образцов с концентратором напряжений при «мягком» нагружении (с контролируемым напряжением в цикле) с использованием соотношений:

$$N_{МЦУ} = F_3(T, \varepsilon), \quad (3)$$

$$N_{МЦУ}^{\text{надп}} = F_4(T, \sigma); \quad (4)$$

• многоцикловую усталость (МнЦУ) [22, 24, 25] (с определением предельных значений размаха напряжений $\Delta\sigma$ и/или амплитуды напряжений σ_a на базах не менее $N \geq 1 \div 2 \cdot 10^7$ циклов для коэффициентов асимметрии цикла $R_\sigma = -1, 0, 0.5$, кривых МнЦУ в графической и аналитической форме с использованием соотношений:

$$N_{МнЦУ} = F_5(T, \sigma), \quad (5)$$

$$N_{МнЦУ}^{\text{надп}} = F_6(T, \sigma); \quad (6)$$

• скорость роста трещины усталости (СРТУ) [26, 27] в условиях плоской деформации на компактных образцах при циклическом внецентренном нагружении с определением параметров C и n уравнения Пэриса, значений скорости роста трещины усталости dl/dN и определением границ интервалов $\Delta K_{\text{мин}}$ и $\Delta K_{\text{макс}}$ второй стадии диаграммы трещиностойкости, на которой наблюдается устойчивый рост трещины усталости, а также представлением кинетической диаграммы скорости роста трещины усталости на второй стадии в графической и аналитической форме с использованием уравнения Пэриса:

$$\frac{dl}{dN} = C \cdot \Delta K^n. \quad (7)$$

Объёмы выборок результатов испытаний образцов (уровни температур испытаний, количество режимов испытаний

при одной температуре, количество образцов на одном режиме испытаний, число образцов от одного представителя материала/полуфабриката, количество представителей данного типа материала/полуфабриката и т.п.) и рекомендуемый вид функций в (1)-(6) подробно регламентированы в [4]. Следует подчеркнуть, что все выборки должны быть получены на основании результатов испытаний образцов, изготовленных из МП промышленного производства того производителя, продукция которого предусмотрена к использованию при серийном изготовлении основных и ответственных деталей сертифицируемого авиадвигателя.

В соответствии с требованиями нормативной документации для расчётов на прочность основных и ответственных деталей газотурбинных двигателей в качестве расчётных значений характеристик упругости, характеристик ползучести и характеристик СРТУ используются средние значения, которые определяются по выборке результатов испытаний, полученных в рамках специальной квалификации данного МП. В качестве расчётных значений X_{P3} остальных указанных выше характеристик должны использоваться величины, которые определяются соотношением

$$X_{P3} = X_{\text{СРЕДН}} - U_P \cdot S(X), \quad (8)$$

где $X_{\text{СРЕДН}}$ – среднее значение характеристики; U_P – значение квантиля распределения Гаусса (нормального распределения) для заданной вероятности неразрушения с заданной доверительной вероятностью; $S(X)$ – среднеквадратическое отклонение, $S(X) = [D(X)]^{0.5}$, $D(X)$ – несмещённая оценка дисперсии.

При расчёте основных деталей принимается $U_P = 3$ для выборки экспериментальных данных, имеющих объём, регламентированный в [4]. Допускается определять минимальные значения механических характеристик с вероятностью неразрушения 99% при доверительной вероятности 95% (99/95) – этот метод реко-

мендуется при числе испытанных образцов $n \geq 10$.

Для расчёта деталей, не отнесённых к категории основных, разрушение которых может вызвать выключение в полёте двигателя многодвигательного летательного аппарата и (или) привести к значительному экономическому ущербу, принимается $U_p = 2$. В этом случае допускается также определять значения механических характеристик с вероятностью неразрушения 90% при доверительной вероятности 95% (90/95). Если используются иные значения U_p , то они должны быть согласованы с Компетентным органом АР МАК.

Необходимо отметить, что гипотеза распределения случайной величины X по нормальному закону справедлива для экспериментальных значений характеристик кратковременной прочности при растяжении σ_B , $\sigma_{0.2}$, δ , Ψ . Для характеристик ДП – время до разрушения $\tau_p(T, \sigma)$, МЦУ – число циклов до разрушения $N_{МЦУ}(T, \Delta\varepsilon)$, и МнЦУ – число циклов до разрушения $N_{МнЦУ}(T, \sigma)$ справедлива гипотеза распределения по логарифмически нормальному закону, т.е. в качестве случайной величины необходимо рассматривать значения $\log X$ ($\log \tau_p$, $\log N_{МЦУ}$ и $\log N_{МнЦУ}$). В этой связи вычисление несмещённых оценок дисперсии $D(X)$ для характеристик σ_B , $\sigma_{0.2}$, δ , Ψ выполняется по стандартным формулам математической статистики.

Для характеристик ДП, МЦУ и МнЦУ оценки дисперсии определяются как дисперсии, характеризующие рассеяние экспериментальных данных относительно кривых ДП, МЦУ и МнЦУ, которые представляют собой кривые регрессии, построенные по (1), (3)-(6). Оценки дисперсии определяются из соотношения [28, 29]:

$$D(X) = \frac{1}{n_p - d - 1} \times \sum_{i=1}^{n_p} \left[\log X_i(T_i, \varepsilon_i, \sigma_i) - \log X_{регр.}(T_i, \varepsilon_i, \sigma_i) \right]^2, \quad (9)$$

где n_p – объём выборки экспериментальных данных, использованных для получения численной модели (1), (3)-(6): d – количество численных коэффициентов модели, значимо отличных от нуля; $X_i(T_i, \varepsilon_i, \sigma_i)$ – экспериментальное значение случайной величины X , полученное по результатам испытаний i -го образца; $X_{регр.}(T_i, \varepsilon_i, \sigma_i)$ – значение величины X , полученное из (1), (3)-(6) для режима испытаний i -го образца.

Полученные оценки дисперсии (9) используются для определения расчётных значений и соответствующих кривых по (1), (3)-(6) и (8), которые оформляются соответствующим отчётным документом. Кроме того, полученные оценки дисперсии используются для возможной корректировки в соответствии с решением разработчика и производителя АД, гарантированных норм технических условий (ТУ) на поставку данным производителем МП.

Отдельно следует отметить особенность определения характеристик конструкционной прочности монокристаллов никелевых сплавов, которые используются для изготовления особо ответственных деталей – лопаток турбин АГТД. Учитывая кристаллографическую анизотропию этих монокристаллов, необходимо получить расчётные значения указанных характеристик для трёх основных кристаллографических направлений - $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$. Эти расчётные значения должны быть получены на основании обработки результатов испытаний в диапазоне рабочих температур и ресурса монокристаллических образцов с аксиальной ориентацией $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$, которые изготовлены по технологии литья монокристаллических лопаток. Объём выборки экспериментальных данных для каждой ориентации регламентирован «Методическими рекомендациями» [4].

При оформлении ТУ на поставку МП основной детали используются значения оценки дисперсии $D(X)$ и среднеквадратического отклонения $S(X)$, полученные по результатам специальной квалификации МП, для корректировки или

подтверждения нормы ТУ (гарантированного уровня свойств по механическим характеристикам). Норма ТУ (кроме характеристик трещиностойкости) должна соответствовать уровню:

$$X_{ТУ} \geq X_{СРЕДН} - 2 \cdot S(X). \quad (10)$$

Если по результатам общей квалификации была принята иная норма ТУ, то необходима соответствующая корректировка ТУ на поставку МП.

С учётом результатов специальной квалификации разработчиком авиадвигателя составляется программа исследований характеристик конструкционной прочности МП в процессе производства двигателя.

В процессе сертификации двигателя исследования конструкционной прочности должны дополняться результатами прочностных испытаний моделей фрагментов деталей, полноразмерных деталей, узлов и двигателей, позволяющими уточнить влияние на прочностные свойства материалов различных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов [30].

В процессе производства двигателя на предприятии - поставщике МП и на предприятии - изготовителе двигателя осуществляется контроль соответствия поставляемых МП ТУ на поставку. Если в процессе определения соответствия МП требованиям ТУ происходит разрушение образца с уровнем свойств ниже критерия отбраковки, указанного в ТУ, должна быть установлена причина разрушения этого образца. Если разрушение не связано с погрешностями при проведении испытаний образца, то о данном событии и мероприятиях, направленных на предотвращение появления дефектов, должны

быть поставлены в известность разработчик двигателя и разработчик МП, которые должны оценить достаточность этих мероприятий. Разработчик двигателя совместно с разработчиком МП, при необходимости, должен согласовать с АР МАК дополнительные мероприятия по обеспечению безопасности эксплуатации.

В соответствии с современными сертификационными требованиями [2, 31, 32] ресурс основных деталей должен подтверждаться с учётом возможного наличия в них дефектов, не выявляемых применяемыми методами неразрушающего контроля. Поэтому ТУ на МП, как правило, должны содержать данные о возможном содержании в изготавливаемых из этих МП деталях металлургических дефектов различных типов и размеров, не выявляемых применяемыми методами неразрушающего контроля.

Если в ТУ на МП данные о возможном содержании в заготовке детали металлургических дефектов различных размеров не включены, то при сертификации типа двигателя разработчик АД представляет отдельный, согласованный с изготовителем двигателя, разработчиком материала и поставщиком МП документ, в котором приведены эти данные; отчёт по результатам исследований, подтверждающий эти данные, и программу периодических исследований по подтверждению соответствия МП этим данным в процессе производства [3].

По результатам квалификации МП разработчиком АД составляется соответствующий отчёт, который является частью доказательной документации, предоставляемой в АР МАК.

Библиографический список

1. Авиационные правила. Ч. 21 «Процедуры сертификации авиационной техники». М.: Межгосударственный авиационный комитет, 1994. 40 с.
2. Авиационные правила. Ч. 33 «Нормы лётной годности двигателей воздушных судов» с поправками 33-1 и 33-2 включительно. М.: Межгосударственный авиационный Комитет, 2012. 46 с.
3. Руководство 33-ВД-М «Порядок оценки соответствия материалов, используемых в конструкции авиационного двигателя, требованиям авиационных правил». М.: ОАО «Авиаиздат», 2013.
4. Рекомендательный циркуляр № РЦ-АП-33.15-1 «Методические рекомендации по определению расчётных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов». М.: ОАО «Авиаиздат», 2013.
5. Руководство Р-СЦМ-01 «Сертификация производства материалов / полуфабрикатов для авиационной техники». Выпуск 3. М.: ОАО «Авиаиздат», 2012.
6. Руководство Р-СЦМ-02 «Оценка состояния технологии производства материалов (полуфабрикатов) при сертификации производства». Выпуск 4. М.: ОАО «Авиаиздат», 2012.
7. Руководство Р-СЦМ-03 «Аттестация лабораторий, проводящих испытания и контроль материалов». Выпуск 5. М.: ОАО «Авиаиздат», 2012.
8. Руководство Р-СЦМ-04 «Оценка качества материалов/полуфабрикатов при сертификации их производств». Выпуск 5. М.: ОАО «Авиаиздат», 2012.
9. Качанов Е.Б. Эффективность внедрения системы менеджмента качества при производстве полуфабрикатов для авиационной техники гражданского назначения // Технология лёгких сплавов. №4. 2013. С. 26-31.
10. Правила аккредитации испытательных лабораторий /центров (ПАЛ 94). М.: Авиационный регистр межгосударственного авиационного комитета, 1994.
11. Методические рекомендации по аккредитации испытательных лабораторий/центров (МР 2010). М.: Авиационный регистр межгосударственного авиационного комитета, 2011.
12. ОСТ 1 90294-80 Стали и сплавы жаропрочные. Метод определения чувствительности к надрезу при испытании на длительную прочность.
13. ГОСТ 9.308-85 ЕС ЗКС. Покрyтия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний.
14. ГОСТ 6032-2003. Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии.
15. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Стандартинформ, 2008. 26 с.
16. ГОСТ 9651-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах.
17. ASTM E-8M. «Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials».
18. ASTM E-21. «Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Testing of Metallic Materials».
19. ГОСТ 10145-81. Металлы. Метод испытания на длительную прочность. М.: Стандартинформ, 1981. 13 с.
20. ГОСТ 3248-81. Металлы. Метод испытания на ползучесть. 11 с.
21. ASTM E-139 «Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials».
22. ГОСТ 25.502-79. Расчёты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.
23. ASTM E-606 «Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing».
24. ASTM E-466 «Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials».
25. ASTM E-468 «Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Tests Results for Metallic Materials».

26. ОСТ 1 021927-90. Металлы. Метод определения скорости роста усталостной трещины при испытании с постоянной амплитудой нагрузки.

27. ASTM E-647 «Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates».

28. Львовский Б.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высшая школа, 1982. 224 с.

29. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение, 1998. 464 с.

30. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигате-

лей / под ред. И.А. Биргера, Б.Ф. Балашова. М.: Машиностроение, 1981. 222 с.

31. Куевда В.К., Ножницкий Ю.А. Новые подходы к управлению ресурсами авиационных двигателей и их основных деталей // Конверсия в машиностроении. 2005, №4-5. С.79-82.

32. Ножницкий Ю.А. Подтверждение ресурса авиационных газотурбинных двигателей и критических по последствиям разрушения деталей этих двигателей // Труды III школы - семинара «Современные проблемы ресурса материалов и конструкций» М.: МАМИ, 2000. С.74-89.

Информация об авторах

Ножницкий Юрий Александрович, доктор технических наук, заместитель генерального директора центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: nozhnitsky@ciam.ru. Область научных интересов: прочность двигателей и элементов конструкций.

Качанов Евгений Борисович, доктор технических наук, профессор, директор Сертификационного центра «МАТЕРИАЛ», г. Москва. E-mail: avccmaterial@yandex.ru. Область научных интересов: материаловедение, качество продукции металлургических предприятий.

Голубовский Евгений Ростиславович, доктор технических наук, профессор, начальник отдела конструкционной прочности сплавов Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: golubovskiy@ciam.ru. Область научных интересов: статическая и циклическая прочность и трещиностойкость материалов и деталей двигателей.

Куевда Виктор Константинович, заместитель председателя президиума Авиационного регистра Межгосударственного авиационного комитета, г. Москва. E-mail: expert@mak.ru. Область научных интересов: ресурс авиационных двигателей.

REQUIREMENTS FOR THE ORDER AND THE PROCEDURE OF ESTIMATING STRUCTURAL STRENGTH CHARACTERISTICS OF METAL ALLOYS FOR THE MAIN AND CRITICAL PARTS OF AVIATION GAS TURBINE ENGINES

© 2015 Y. A. Nozhnitsky¹, E. B. Kachanov², E. R. Golubovsky¹, V. K. Kouevda³

¹Central institute of aviation motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation

²Certification Center «МАТЕРИАЛ», Moscow, Russian Federation

³The Interstate Aviation Committee (IAC), Moscow, Russian Federation

Requirements of the technical regulations for the order and procedure of estimating structural strength of metal alloys used in critical and main parts of aviation engines in their certification are outlined in the paper. The scope of work to be carried out by the engine designer, the developer of the material/semi-finished product and

the engine manufacturer to confirm the compliance with the mentioned requirements is described. The tasks to be solved at different stages of general and special qualification of the material are discussed. The spectrum of the main mechanical characteristics of alloys, including mono-crystal alloys, to be determined during the qualification tests is presented. The standards in accordance to which the tests are to be performed are mentioned. Relationships for the determination of the material characteristics to be used in estimating the strength and service life of engine parts are given. The requirements for the statistical processing of the results of investigating the structural strength of alloys are discussed, as well as the requirements for setting the values of the mechanical properties guaranteed in the delivery of materials/semi-finished products. The necessity to have data on possible presence of different defects in the main (critical for safe operation) engine parts is mentioned. The reference list includes principal technical regulations the requirements of which are to be met during special qualification of alloys used for the manufacture of the main and critical aviation engine parts.

Certification of manufacturer's material/semi-finished product, attestation and accreditation of testing laboratories, qualification of material/semi-finished product, characteristics of structural strength.

References

1. Aviation Rules. Part 21. «Certification Procedures for aviation technics». Moscow: Interstate Aviation Committee Publ., 1994. 40 p. (In Russ.)
2. Aviation rules. Part 33. «Norms of airworthiness of aircraft engines», with Amendments 33-1 and 33-2, inclusive. Moscow: Interstate Aviation Committee Publ., 2012. 46 p. (In Russ.)
3. Guide 33-VD-M «The order of evaluation of conformity of the materials used in the construction of aircraft engine, the requirements of Aviation regulations». Moscow: Aviaizdat Publ., 2013. (In Russ.)
4. Advisory Circular No. RC-AP-33.15-1 «Guidelines for determining design values of the characteristics of structural strength metallic materials». Moscow: Aviaizdat Publ., 2013. (In Russ.)
5. Manual R-CCM-01 «Certification of production materials / prefabricates for aviation technics». Iss. 3. Moscow: Aviaizdat Publ., 2012. (In Russ.)
6. Manual R-CCM -02 Estimation of the production technology of materials (semi-finished) for the certification of production. Issue 4. Moscow: Aviaizdat Publ., 2012. (In Russ.)
7. Manual R-CCM -03 Certification of laboratories conducting tests and inspection of materials. Issue 5. Moscow: Aviaizdat Publ., 2012. (In Russ.)
8. Manual R-CCM-04 «Quality Assessment of materials / semi-finished products at certification their production». Issue 5. Moscow: Aviaizdat Publ., 2012. (In Russ.)
9. Kachanov E.B. Efficiency of Application of the Quality Management System in Enterprises Producing Semi-products for Civil Aircraft. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2013. No. 4. P. 26-31. (In Russ.)
10. Rules of accreditation of testing laboratories /centers (PAL 94). Moscow: Aviation Register of International Aviation Committee Publ., 1994. (In Russ.)
11. Guidelines for the accreditation of testing laboratories / canters (MR 2010). Moscow: Aviation Register of International Aviation Committee Publ., 2011. (In Russ.)
12. OST 1 90294-80. Steel and heat resistant alloys. A method of determining the sensitivity to notch when tested for long-term strength. (In Russ.)
13. GOST 9.308-85. Unified system of corrosion and ageing protection. Metal and non-metal inorganic coatings. Methods for accelerated corrosion tests. (In Russ.)
14. GOST 6032-2003. Corrosion-resistant steels and alloys. Test methods of intercrystalline corrosion resistance. (In Russ.)
15. GOST1497-84. Metals. Methods of tension test. (In Russ.)
16. GOST 9651-84. Metals. Methods of tension tests at elevated temperatures. (In Russ.)
17. ASTM E-8M «Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials».
18. ASTM E-21 «Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Testing of Metallic Materials».

19. GOST 10145-81. Metals. Stress-rupture test method. (In Russ.)
20. GOST 3248-81. Metals. Creep test method. (In Russ.)
21. ASTM E-139 «Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials».
22. GOST 25.502-79. Strength analysis and testing in machine building. Methods of metals mechanical testing. Methods of fatigue testing. (In Russ.)
23. ASTM E-606 «Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing».
24. ASTM E-466 «Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials».
25. ASTM E-468 «Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Tests Results for Metallic Materials».
26. OST 1 021927-90. Metals. Method of determining the rate of growth of fatigue cracks in the test with constant amplitude load. (In Russ.)
27. ASTM E-647 «Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates».
28. Lvovskiy B.N. *Statisticheskie metody postroyeniya empiricheskikh formul* [Statistical methods for constructing empirical formulas]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1982. 224 p.
29. Kablov E.N., Golubovskiy E.R. *Zharoprochnost nikelovykh splavov* [Heat-resistant nickel alloys]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1998. 464 p.
30. Structural strength of gas turbine engine materials and parts / ed. by I.A. Birger, B.F. Balashov. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 222 p.
31. Kuevda V.K., Nozhnitsky Y.A. New approach for management of life of aviation engines and their main parts. *Conversion in mashinbuilding of Russia*. 2005. No 4-5. P. 79-82. (In Russ.)
32. Nozhnitsky Y.A. Confirmation of life of aviation gas turbine engines and their critical parts. *Proc. of the third school-seminar «Modern problems of life of materials and structures»*. Moscow: Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI) Publ., 2000. P. 74-89. (In Russ.)

About the authors

Nozhnitsky Yuri Aleksandrovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy General Director of Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: nozhnitsky@ciam.ru. Area of Research: strength of engines and structural elements.

Kachanov Evgeny Borisovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Director of the Certification Center «MATERIAL». E-mail: av-ccmaterial@yandex.ru. Area of Research: materials science, quality of products of iron and steel companies.

Golubovskiy Evgeny Rostislavovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Structural Strength Alloys, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: golubovskiy@ciam.ru. Area of Research: static and cyclical strength and crack resistance of materials and parts of engines.

Kuevda Viktor Konstantinovich, Candidate of Science (Engineering), Deputy Head of Aviation Register Presidium of Interstate Aviation Committee. E-mail: expert@mak.ru. Area of Research: life of engines.