



УДК 620.172

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-12-12

**ПРОВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ
РАСТЯЖЕНИИ НА МАШИНАХ ФИРМЫ Zwick/Roell**

А.Е. Соловьев

С.А. Голынец

К.К. Хвацкий

И.Р. Асланян

доктор технических наук

Август 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 620.172

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-12-12

А.Е. Соловьев¹, С.А. Голынец¹, К.К. Хвацкий¹, И.Р. Асланян¹

ПРОВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ НА МАШИНАХ ФИРМЫ Zwick/Roell

Материалы элементов конструкций авиационных газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации подвергаются большому спектру статических и динамических нагрузок в широком интервале рабочих температур и долговечностей, поэтому 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 работе представлен статистический обзор значений предела прочности при растяжении, полученных на машинах фирмы Zwick/Roell, на примере титанового сплава VT41.

Ключевые слова: статические испытания, упругость, прочность.

A.E. Solovyev, S.A. Golynets, K.K. Khvatsky, I.R. Aslanyan

PERFORMING OF STATIC TENSILE TESTS ON ZWICK/ROELL MACHINES

In the course of operation, materials of aircraft gas turbine engine components are subjected to very different static and dynamic loads over a wide range of operating temperature and durability. Therefore, for strength calculations of basic engine parts and verification of their resource it is necessary to have a large nomenclature of the strength characteristics of metals under static and cyclic loading. This paper presents a statistical overview of tensile strength of titanium alloy VT41 obtained on Zwick/Roell machines.

Keywords: static tests, elasticity, strength.

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

Успешное развитие отечественного авиастроения предполагает разработку и внедрение новых материалов и технологий в производственный процесс [1–6]. При внедрении новых материалов необходимо выпустить специальный комплект документации, фиксирующей характеристики материала, т. е. дать квалификацию материала. При общей квалификации материала выпускают паспорт, характеризующий уровни свойств выпускаемого материала, технические условия и технологическую инструкцию, определяющие процесс изготовления материала в серийном производстве. При специальной квалификации материала проводят серию испытаний, направленных на получение расчетных характеристик материала с учетом условий эксплуатации, в том числе коррозионные испытания. Определение механических свойств материалов при статическом действии нагрузки является наиболее распространенным способом испытаний при квалификации материалов. В частности, номенклатура прочностных характеристик металлических материалов, необходимых для паспортизации и квалификации основных деталей авиадвигателя, включает следующие характеристики: упругости и кратковременной прочности при растяжении, длительной прочности и ползучести при растяжении, малоциклового (МЦУ) и многоциклового усталости (МнЦУ), а также трещиностойкости при малоцикловом нагружении (СРТУ). Все эти характеристики определяются в соответствии со стандартами – отечественными (ГОСТ и ОСТ), зарубежными (ASTM, DIN и BS) и международными (ISO).

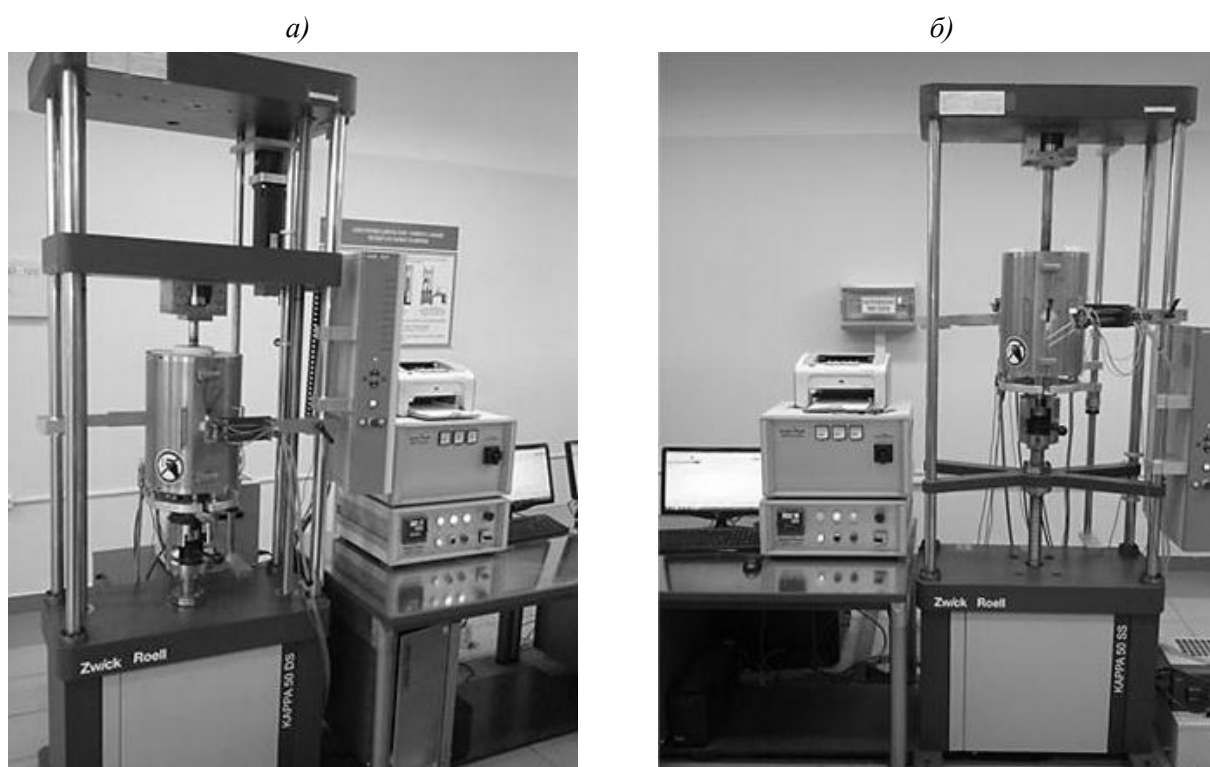
В настоящее время уровень свойств материалов, используемых в авиастроении, резко возрос и в связи с этим совершенствование экспериментальной техники и использование современных испытательных машин при квалификации материалов приобретает особую актуальность [7–10]. Одним из мировых лидеров по выпуску испытательного оборудования является фирма Zwick/Roell (Германия).

Испытательные машины серии KAPPA (DS и SS) изготовлены в соответствии с требованиями современных стандартов на методы механических испытаний. На этих машинах определяются характеристики кратковременной и длительной прочности, ползучести.

В данной работе представлены результаты определения предела прочности при растяжении на машинах фирмы Zwick/Roell серии KAPPA на примере титанового сплава BT41. Титановый сплав BT41 рекомендуется для изготовления деталей компрессора высокого давления.

Материалы и методы

В лаборатории прочности и надежности материалов авиационных двигателей и силовых энергетических установок ВИАМ имеются универсальные испытательные машины типа KAPPA 050 DS и KAPPA 050 SS, предназначенные для проведения статических испытаний образцов из металлов и сплавов на растяжение при комнатной и повышенных температурах в интервале температур 300–1150°C (см. рисунок). Максимальная нагрузка при испытании составляет 50 кН. Технические характеристики машины представлены в табл. 1. Конструктивные отличия испытательных машин состоят в том, что машина типа KAPPA 050 DS имеет верхнюю подвижную траверсу, а машина типа KAPPA 050 SS – нижнюю подвижную траверсу.



Универсальные испытательные машины типа KAPPA 050 DS (а) и KAPPA 050 SS (б) для проведения статических испытаний

Кроме того, в машинах этого класса предусмотрены два навесных измерителя деформации (экстензометры): продольной и поперечной. Измерители деформации представляют собой датчики с керамическими стержнями, которые в процессе проведения испытаний крепятся непосредственно на образец, что позволяет замерять одновременно на одном образце продольную и поперечную деформации как при комнатной, так и при повышенных температурах. Одновременный замер деформации в поперечном и продольном направлениях на одном образце позволяет определить коэффициент Пуассона, который представляет собой отношение этих величин. Данные машины так-

же оснащены разъемной электропечью типа НТО-34, что позволяет проводить испытания при температурах до 1150°C, и приборной стойкой с управляющим компьютером.

Таблица 1

Технические характеристики машины типа КАРРА 050

| Технический параметр | Значение параметра |
|--|--------------------|
| Нагружающая рама | |
| Усилие испытания при растяжении/сжатии, кН | 50 |
| Высота, мм | 2250 |
| Ширина, мм | 860 |
| Глубина, мм | 400 |
| Высота рабочей зоны, мм | 1190 |
| Ширина рабочей зоны, мм | 600 |
| Привод | |
| Скорость траверсы, мм/мин | От 0,001 до 100 |
| Максимальная частота испытания, Гц | 0,5 |

Предел прочности при растяжении определяли в соответствии с требованиями отечественных и зарубежных стандартов ГОСТ Р 1497, ГОСТ Р 9651, ASTM E-8, ASTM E-21 при температурах 20, 500, 550, 600 и 650°C.

Расчетные значения предела прочности материала определяли на основе статистической обработки данных, полученных по результатам стандартных испытаний. В качестве расчетных характеристик использовали средние значения.

Результаты и обсуждение

Известно, что характеристики прочности материалов имеют статистический характер вследствие микро- и макронеоднородности материала образца и методических особенностей эксперимента, поэтому испытания при растяжении неизбежно приводят к рассеянию результатов.

Для определения значений характеристик конструкционной прочности при статистической обработке экспериментальных данных принимается гипотеза, что результаты механических испытаний образцов из металлических материалов (полуфабрикатов) распределены по нормальному (или логарифмически нормальному – логнормальному) закону – так называемому распределению Гаусса.

Характеристики, полученные при растяжении (в том числе предел прочности), подчиняются нормальному закону распределения. Закон распределения Гаусса характеризуется двумя параметрами распределения – средним значением (математическим ожиданием) X_{cp} и дисперсией D . Для выборки результатов испытаний ограниченного

объема, которые используются в инженерной практике, вычисляют выборочные оценки среднего значения $X_{\text{ср}}$ и выборочные несмещенные оценки дисперсии D :

$$X_{\text{ср}} = \frac{1}{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} x_j ;$$

$$D(X) = \frac{1}{N_p - 1} \sum_{i=1}^{N_p} (x_i - X_{\text{ср}})^2 ,$$

где N_p – объем выборки экспериментальных данных.

В инженерных расчетах также определяют среднеквадратическое отклонение (СКО):

$$S(X) = \sqrt{D(X)} .$$

Прочностные характеристики материалов должны определяться на основании достаточного количества испытаний, позволяющего установить статистически обоснованные расчетные значения. Для большинства расчетных характеристик конструкционной прочности основных деталей авиационного газотурбинного двигателя рекомендуется использовать значение квантиля распределения Гаусса, равное 3. Для большинства расчетных характеристик конструкционной прочности деталей, не отнесенных к категории основных деталей авиационного газотурбинного двигателя, приемлемым значением является 2.

Результаты испытаний образцов из титанового сплава ВТ41 при различных температурах представлены в табл. 2.

Таблица 2

Статистическая обработка значений предела прочности титанового сплава ВТ41 при комнатной и повышенных температурах

| Температура испытаний, °С | $X_{\text{ср}}$ | СКО | 3 СКО | D |
|---------------------------|-----------------|------|-------|------|
| 20 | 1080 | 15,8 | 47,4 | 250 |
| 500 | 850 | 8,5 | 25,6 | 73 |
| 550 | 780 | 8,5 | 25,6 | 73 |
| 600 | 730 | 6,5 | 19,5 | 42,5 |
| 650 | 640 | 11,2 | 33,6 | 125 |

Испытания, проведенные на машинах фирмы Zwick/Roell типа KAPPA DS и KAPPA SS, показали, что разброс экспериментальных значений предела прочности титанового сплава ВТ41 при различных температурах незначителен: 6,5–15,8 МПа, что составляет 0,9–1,4%.

Заключение

Как показали результаты механических испытаний образцов из титанового сплава BT41, проведенные на машинах фирмы Zwick/Roell серии KAPPA (DS и SS), полученные значения предела прочности при растяжении характеризуются небольшим разбросом экспериментальных значений, что составляет 0,9–1,4%.

Благодарности

Авторы работы выражают искреннюю признательность инженеру С.В. Гудкову за техническую поддержку при обработке результатов.

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.
2. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 60–70.
3. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №15. С. 3–9.
4. Kablov E.N. Ways for improving the heat resistance of nickel alloys //Металлург. 2000. №4. С. 26–28.
5. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука. 2006. 632 с.
6. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ в конструкциях перспективных двигателей разработки ОАО «Авиадвигатель» //ИБ «Пермские авиационные двигатели». 2014. №31. С. 43–47.
7. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего //Автоматическая сварка. 2013. №10. С. 23–32.
8. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» /Под общ. ред. Е.Н. Каблова М.: Фонд «Наука и жизнь». 2013. 128 с.
9. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н. ВИАМ – основоположник отечественной технологии литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД и ГТУ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 105–117.

10. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 129–141.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»] //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Kablov E.N., Mubojadzhan S.A. Zharostojkie i teplozashhitnye pokrytija dlja lopatok turbiny vysokogo davlenija perspektivnyh GTD [Heat resisting and heat-protective coverings for turbine blades of high pressure of perspective GTD] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 60–70.
3. Kablov E.N. Materialy dlja izdelija «Buran» – innovacionnye reshenija formirovanija shestogo tehnologicheskogo uklada [Materials for the product «Buran» – innovative solutions of forming of the sixth technological way] //Авиационные материалы и технологии. 2013. №15. С. 3–9.
4. Kablov E.N. Ways for improving the heat resistance of nickel alloys //Metallurg. 2000. №4. С. 26–28.
5. Liteye lopatki gazoturbinnnyh dvigatelej. Splavy, tehnologii, pokrytija [Cast blades of gas turbine engines. Alloys, technologies, coverings]. 2-e izd. /Pod obshh. red. E.N. Kablova. M.: Nauka. 2006. 632 s.
6. Kablov E.N. Materialy i tehnologii VIAM v konstrukcijah perspektivnyh dvigatelej razrabotki OAO «Aviadvigatel'» [Materials and VIAM technologies in designs of perspective engines of development of JSC Aviadvigatel] //IB «Permskie aviacionnye dvigateli». 2014. №31. С. 43–47.
7. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Strategicheskie napravlenija razvitija konstrukcionnyh materialov i tehnologij ih pererabotki dlja aviacionnyh dvigatelej nastojashhego i budushhego [The strategic directions of development of constructional materials and technologies of their processing for aircraft engines of the present and the future] //Автоматическая сварка. 2013. №10. С. 23–32.

8. Dospehi dlja «Burana». Materialy i tehnologii VIAM dlja MKS «Jenergiya–Buran» [Armor for «Buran». Materials and VIAM technologies for ISS of «Energiya–Buran»] /Pod obshh. red. E.N. Kablova M.: Fond «Nauka i zhizn'». 2013. 128 s.
9. Kablov E.N., Tolorajja V.N. VIAM – osnovopolozhnik otechestvennoj tehnologii lit'ja monokristallicheskih turbinnyh lopatok GTD i GTU [VIAM – the founder of domestic casting technology of single-crystal turbine blades of GTD and GTU] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 105–117.
10. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Kompleksnaja innovacionnaja tehnologija izotermicheskoj shtampovki na vozduhe v rezhime sverhplastichnosti diskov iz superzharoprochnyh splavov [Complex innovative technology of isothermal punching on air in mode of superplasticity of disks from superhot strength alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 129–141.