

УДК 539.4; 621.81

<sup>1</sup>Н. П. Великанова, <sup>1</sup>П. Г. Великанов, <sup>2</sup>А. С. Киселев

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева-КАИ Казань, Россия

<sup>2</sup> ОАО КПП «Авиамотор» Казань, Россия

## ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАРАБОТКИ НА КРАТКОВРЕМЕННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН АВИАЦИОННЫХ ГТД

*Выполнен статистический анализ кратковременных основных механических свойств (ОМС) жаропрочных сплавов литейного ЖСБУ-ВИ равноосной кристаллизации для лопаток турбин и деформируемого ЭИ698-ВД для дисков турбин авиационных ГТД большого ресурса для гражданской авиации. Исследованы выборки ОМС в исходном состоянии и после наработки до 9500 часов для рабочих лопаток и до 18000 часов для дисков турбин. Для проверки соответствия эмпирических функций распределения ОМС теоретическим законам использовались графический анализ и критерии для проверки статистических гипотез.*

**Ключевые слова:** конструкционные материалы, механические свойства, закон распределения, числовые параметры распределений, рабочие лопатки и диски турбин, эксплуатационная наработка.

### Введение

Для оценки долговечности и ресурса элементов конструкций в вероятностном аспекте в качестве исходных данных, кроме характеристик сопротивления длительному статическому, малоцикловому и усталостному разрушению, используется комплекс характеристик основных механических свойств (характеристик прочности и пластичности), полученных для различных уровней вероятности.

К ним относятся такие основные механические свойства (ОМС) металлов, как предел прочности  $\sigma_B$ , предел пропорциональности  $\sigma_{0,02}$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительное сужение  $\psi$ , истинное сопротивление разрыву  $S_R$  и показатель упрочнения  $m$  [1].

Знание функций распределения ОМС для эксплуатационных условий позволяет обоснованно выбирать материалы при изготовлении конструкций на основе обеспечения требуемого уровня расчетных механических характеристик с заданной вероятностью. Кроме того, надежная статистическая оценка значений ОМС позволяет получить их минимальные гарантированные значения для принятых технологий производства.

В работе [2] было показано, что рассеяние статических характеристик оказывает существенное влияние на рассеяние параметров циклического деформирования.

Рассеяние значений ОМС определяется как неоднородностью макро- и микроструктуры материала, так и отклонениями, имеющимися при изготовлении образцов и при их испытаниях. При этом для материала различных плавок колебания факторов, определяющих структуру материала для установившихся заводских технологий, обычно носят случайный характер [3].

Исследования ОМС в статистическом аспекте выполнены достаточно большим количеством авторов, но большинство из них исследовало конструкционные материалы для энергомашиностроения. Для конструкционных материалов, применяющихся в авиадвигателестроении, таких работ немного – это [4, 5, 6].

Все вышеизложенное относится к исходным ОМС, т.е. механическим свойствам материалов в состоянии поставки.

В процессе длительной эксплуатации авиационных двигателей под действием деформационного и температурного старения исходные ОМС материалов имеют тенденцию к изменению, что необходимо учитывать для успешного решения проблемы прогнозирования долговечности и ресурса элементов конструкций авиационных ГТД. Работ, в которых оценивалось влияние эксплуатационной наработки на механические свойства материалов для деталей турбин авиационных ГТД, совсем немного – это [7,8,9]. Поэтому статистический анализ ОМС в исходном состоянии и после длительной эксплуатации является актуальным для авиадвигателестроения.

**Цель и задачи исследования**

Целью работы является статистический анализ влияния длительной эксплуатации на механические свойства жаропрочных сплавов на никелевой основе для рабочих лопаток и дисков турбин авиационных ГТД.

Для этого необходимо выполнить статистическую обработку данных о механических свойствах материалов для деталей турбин, установить законы и числовые характеристики распределений и выявить тенденции изменения ОМС в процессе наработки.

**Объекты и методы исследования**

Объектами исследования в данной работе являются механические свойства рабочих лопаток и дисков турбин авиационных ГТД семейства НК-8 для гражданской авиации. Материал рабочих лопаток – литейный жаропрочный сплав на никелевой основе ЖС6У-ВИ равноосной кристаллизации; материал дисков – деформируемый жаропрочный сплав на никелевой основе ЭИ698-ВД.

Для оценки влияния эксплуатационной наработки на механические свойства рассматриваемых деталей турбин были проведены испытания образцов, вырезанных из рабочих лопаток турбин двигателей до 9500 часов и дисков турбин двигателей с наработкой до 18137 часов.

Испытания механических свойств материалов деталей турбин проводились в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытания на растяжение» при температуре +20 °С. Образцы из рабочих лопаток вырезались из «холодной» зоны (корневое сечение пера, исходное состояние) и из «горячей» зоны (среднее сечение пера, данные после наработки). При этом использовались образцы с диаметром рабочей части 3 мм с неоформленным захватом (головкой) диаметром 5 мм, вырезанных в зоне наибольшей толщины профиля пера. Образцы из дисков вырезались из припуска (исходное состояние), из ободной, ступичной частей и полотна дисков после наработки. Образцы из дисков были стандартными – цилиндрическими с диаметром рабочей части 5 мм.

**Результаты исследования**

В результате проведенного исследования установлено, что изменение кратковременных механических свойств материалов рабочих лопаток и дисков турбин при нормальной температуре имеет общую тенденцию: прочностные характеристики (предел прочности, предел текучести) для рассматриваемых сплавов изменяются незначительно, относительно исходного состояния наблюдается даже их некоторое повышение в интервале рассмотренных значений наработки; характеристики пластичности (относительное удлинение, относительное сужение) для сплавов

ЖС6У-ВИ и ЭИ698ВД снижаются, для сплава ЭИ698-ВД в отдельных случаях ниже норм ТУ на новый материал.

На рисунках 1 и 2 приведено изменение механических свойств – предела прочности и относительного сужения для материала дисков турбин – сплава ЭИ698-ВД. На этих рисунках приняты следующие обозначения: х – исходное состояние материала, о – состояние материала после наработки в эксплуатации.

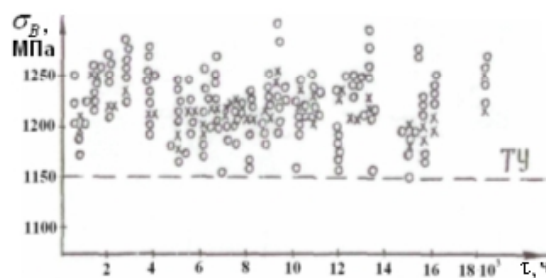


Рис. 1. Изменение предела прочности сплава ЭИ698-ВД в зависимости от наработки

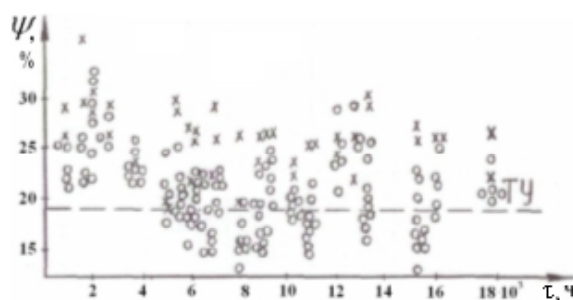


Рис. 2. Изменение относительного сужения сплава ЭИ698-ВД в зависимости от наработки

На рисунках 3 и 4 приведено изменение механических свойств – предела прочности и относительного сужения для материала рабочих лопаток турбин – сплава ЖС6У-ВИ. На этих рисунках приняты следующие обозначения: х – исходное состояние материала, о – состояние материала после наработки в эксплуатации.

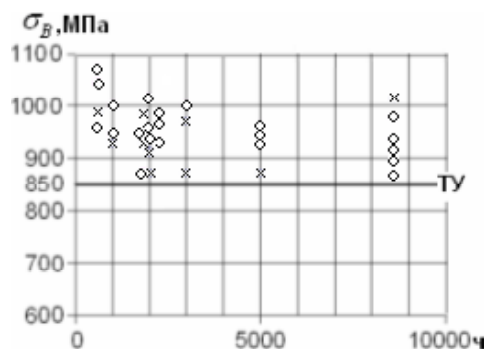


Рис. 3. Изменение предела прочности сплава ЖС6У-ВИ в зависимости от наработки

Снижение характеристик пластичности жаропрочных никелевых сплавов для деталей турбины в эксплуатации обусловлено процессами температурного и деформационного старения.

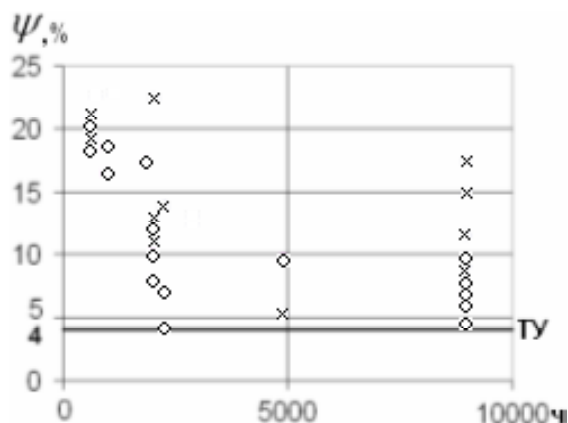


Рис. 4. Изменение относительного сужения сплава ЖС6У-ВИ в зависимости от наработки

В результате статистического анализа механических свойств материалов деталей турбин было установлено, что эмпирические распределения данных о механических свойствах сплавов, как в исходном состоянии, так и после наработки в эксплуатации не противоречит нормальному закону распределений. При этом характеристики рассеяния механических свойств не зависят от наработки, а средние значения характеристик пластичности имеют тенденцию к снижению с увеличением наработки. В процессе статистического анализа для проверки статистических гипотез использовались как графический метод, так и критерии Шапиро-Уилка, Бартлета и Фишера.

Для количественной оценки снижения пластичности материалов рассматриваемых деталей турбин, определяемого по параметру относительного сужения, построена регрессионная зависимость с использованием метода наименьших квадратов:

$$\bar{\Psi}_\tau = \bar{\Psi}_0 \cdot \tau_3^{-\beta}, \quad (1)$$

где  $\bar{\Psi}_\tau$  - среднее значение относительного сужения материала детали в исходном состоянии;  $\tau_3$  - наработка в эксплуатации.

Показатель степени  $\beta$  для материала лопаток и дисков находится в пределах от 0,006 до 0,0207.

## Заключение

Результаты исследования имеют важное значение для прогнозирования ресурса авиационных ГТД и для оценки индивидуального ресурса.

## Литература

1. Махутов Н.А. Статистические закономерности малоциклового разрушения [Текст] / Махутов Н.А., Зацаринный В.В., Базарас Ж.Л. и др. – М.: Наука, 1989. – 252 с.
2. Махутов Н.А. Механика малоциклового разрушения [Текст] / Махутов Н.А., Романов А.Н. – М.: Наука, 1986. – 264 с.
3. Меандров Л.В. Статистический контроль металлопроката по механическим свойствам [Текст] / Меандров Л.В., Семенов Ю.Н., Перепелкин В.П. // Заводская лаборатория, 1977. - №10. – С. 86-89.
4. Дарчинов Э.Н. Статистический анализ и нормирование механических свойств материалов и деталей авиадвигателей [Текст] / Э.Н. Дарчинов // Авиационная промышленность. - 1978. - №5. – С. 20-23.
5. Дарчинов Э.Н. Применение статистических алгоритмов оптимизации механических свойств деталей в серийном производстве [Текст] / Э.Н. Дарчинов // Авиационная промышленность. - 1976.- №7. – С. 98-102.
6. Вероятностные характеристики авиационных материалов и размеров сортамента [Текст]: справ. / под ред. Охупкина О.С. – М.: Машиностроение, 1970. – 568 с.
7. Великанова Н.П. Влияние длительной эксплуатационной наработки на характеристики долговечности жаропрочных сплавов для деталей турбин [Текст] / Великанова Н.П., Протасова Н.А. // Изв. вузов. Авиационная техника. - 2008.- №3. – С. 41-45.
8. Королев А.Н. Влияние эксплуатационных факторов на долговечность дисков турбин авиационных ГТД [Текст] / Королев А.Н., Великанова Н.П., Закиев Ф.К. // Авиационно-космическая техника и технология. - 2001. - Вып. 23. - С. 116-118.
9. Velikanova, N.P. Engine Running Time Effect on Turbine Disk Strength [Text] / N.P. Velikanova / Proc. Intern. Conf. «ICAE-90». Moscow-Zagorsk: CIAM. -1990.- P. 90-97.

Поступила в редакцию 01.06.2012

**Н.П. Великанова, П.Г. Великанов, О.С. Кисельов. Вплив експлуатаційного напруження на короткочасні механічні властивості жароміцних сплавів на нікелевій основі для деталей турбін**

*Виконано статистичний аналіз короткочасних основних механічних властивостей (ОМС) жароміцних сплавів ливарного ЖС6У-В рівновісної кристалізації для лопаток турбін і деформуємого ЕЛ698-ВД для дисків турбін авіаційних ГТД великого ресурсу для цивільної авіації. Досліджено вибірки ОМС в початковому стані і після напруження до 10500 годин для робочих лопаток і до 18000 годин для дисків турбін. Для перевірки відповідності емпіричних функцій розподілу ОМС теоретичним законам використовувалися графічний аналіз та критерії для перевірки статистичних гіпотез.*

**Ключові слова:** конструкційні матеріали, механічні властивості, закон розподілу, числові параметри розподілів, робочі лопатки і диски турбін, експлуатаційне напруження.

**N.P. Velikanova, P.G. Velikanov, A.S. Kiselev. Influence of operational hours on mechanical properties of heat-resistant short nickel-based alloys for turbine parts**

*Shows the design of the burner ring combustor gas turbine ground pumping unit to adjust the parameters of the characteristics of the temperature field without partial disassembly and removal of the combustion chamber burners for fine-tuning on the test bench. The proposed construction of single-burner to reduce the circumferential non-uniformity of the temperature field of an annular combustion chamber of terrestrial gas turbine and to regulate the temperature field with throttling washers without disassembly with less to carry out works.*

**Key words:** construction materials, mechanical properties, the distribution, the numerical parameters of the distributions, rotor blades and turbine disks, operating working hours.