

В сборник трудов НПО Энергомаш №29

Главный редактор

\_\_\_\_\_ В. К. Чванов

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2012 г.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАПАЗОНА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА КРЫЛЬЧАТКИ НАСОСА ОКИСЛИТЕЛЯ ЖРД**

*Кандидаты техн. наук А.Е. Милов, В.В. Ткач*

Представлены результаты расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) крыльчатки насоса окислителя двигателя РД191 с использованием её детальной геометрической модели и расчёта нагрузок по модели пространственного течения в межлопаточном канале с учетом кавитации с целью определения диапазона механических характеристик материала крыльчатки, в котором обеспечивается требуемый запас прочности.

*Ключевые слова:* жидкостные ракетные двигатели; насосы; центробежная крыльчатка; статическая прочность; циклическая долговечность; конечно-элементная модель.

### **Введение**

В процессе проектирования ЖРД и конструкторского сопровождения их производства могут меняться требования к минимально допустимым запасам прочности конструкции при:

– переквалификации для много- или однократного применения;

- назначении для эксплуатации в ракетно-космических системах, осуществляющих пилотируемые или непилотируемые пуски;

- уменьшение неопределенностей путём введения более точных методов моделирования при расчете нагрузок, более полном учете конструктивных особенностей и т.п.;

- проработки мероприятий направленных на удешевление материала конструкции и/или технологии её изготовления (эффективно только при замене высокочрезвычайно затратных технологий и материалов).

Задача замены материала детали в перечисленных случаях может быть решена, если известен диапазон механических характеристик (МХ) в котором обеспечиваются требуемые запасы прочности. Для получения этого диапазона может быть использовано численное моделирование.

В статье предлагается методика расчета диапазона МХ, применимая к деталям с заранее определенной (неизменной в процессе вычислений) геометрией.

На примере центробежной крыльчатки насоса окислителя двигателя РД191, как для одного из самых дорогих элементов, определён диапазон значений МХ материала, обеспечивающих минимально допустимый запас прочности при статических нагрузках на максимальном режиме работы двигателя. Описываемая методика включает в себя:

- оценку НДС крыльчатки, изготовленной из штатного материала;

- определение диапазона МХ.

## **1. Оценка НДС крыльчатки, изготовленной из штатного материала**

### **1.1. Исходные данные для расчёта**

Крыльчатка насоса окислителя имеет семь основных лопаток двойной кривизны, вспомогательные лопатки и покрывной диск. Рабочая температура минус  $174^{\circ}\text{C}$ . Штатный материал – порошковый никелевый сплав ЭП741НП.

МХ сплава при рабочей температуре  $-174^{\circ}\text{C}$  [1]:

модуль упругости  $E=2,343 \cdot 10^4$  кгс/мм<sup>2</sup>;

относительное удлинение в момент разрыва  $\delta=15\%$ ;

предел текучести  $\sigma_T=104,5$  кгс/мм<sup>2</sup>;

предел прочности  $\sigma_B=136,5$  кгс/мм<sup>2</sup>;

коэффициент линейного расширения  $\alpha=11 \cdot 10^{-6}$ ;

плотность при нормальной температуре  $\rho=8,35$  г/см<sup>3</sup>.

Нагрузки, действующие на крыльчатку, включают центробежную силу при частоте вращения  $24000 \text{ мин}^{-1}$  и давление на её поверхности, определенное путем моделирования пространственных течений с учетом кавитации [2]. Нагрузки соответствуют режиму работы двигателя по тяге равному 105%.

### **1.2. Математическая модель**

Математическая модель крыльчатки выполнена в виде периодической (1/7 часть) конечно-элементной модели (КЭМ), состоящей из 220 тыс. конечных элементов типа гексаэдр (8 узлов) и 250 тыс. узлов. Модель учитывает совместную работу дисков и лопаток при нагружении, поскольку построена без упрощений по номинальной параметрической геометрии (рис. 1).

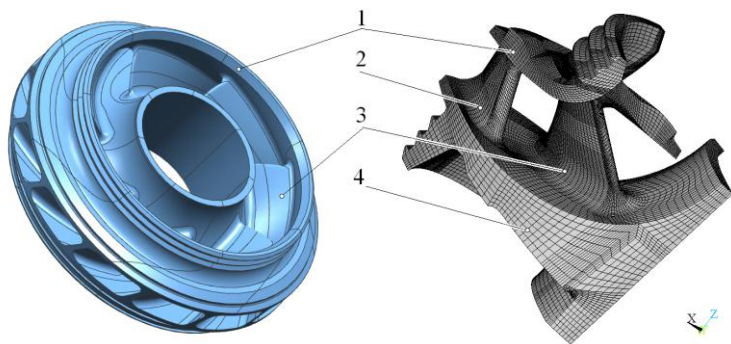


Рис. 1. Параметрическая геометрическая модель крыльчатки (слева) и периодическая КЭМ крыльчатки (справа): 1 – покрывной диск; 2 – вспомогательная лопатка; 3 – основная лопатка; 4 – основной диск

Модель ограничена по угловым и осевым перемещениям, а на границах круговой симметрии задано условие периодичности (рис. 2).

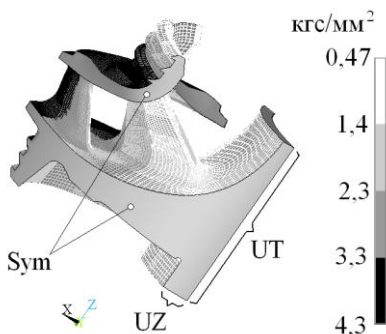


Рис. 2. Граничные условия: давление на поверхности (цветная шкала); UT – ограничение поворота по цилиндрической поверхности; UZ – ограничение перемещений в осевом направлении по торцу; Sym – граница круговой симметрии

Для выполнения упруго-пластического расчета НДС в модель материала включена кривая деформирования (рис. 3), интерполированная квадратичным полиномом на участках “предел

пропорциональности” ( $\sigma_{пр}$ ) → “предел текучести” → “предел временной прочности”. Величина предела пропорциональности принята равной  $0,8 \cdot \sigma_T$ , величина предельных деформаций принята равной  $\delta$ .

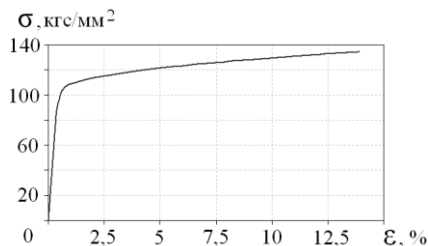


Рис. 3. Кривая деформирования сплава ЭП741НП при температуре минус  $174^{\circ}\text{C}$ .  $\epsilon$  – относительное удлинение

При расчёте напряженно-деформированного состояния крыльчатки использовался программный комплекс метода конечных элементов ANSYS Mechanical APDL 10.0.

### 1.3. Результаты расчета

Результаты расчета крыльчатки на статическую прочность показывают наличие высоких градиентов напряжений на входных кромках основной и вспомогательной лопаток в местах их сопряжения с дисками. Максимальные напряжения (рис. 4) возникают в покрывном диске с внутренней стороны переднего бурта (лабиринтное уплотнение), где запас по прочности составляет  $n_B=1,64$  при требуемом «Нормами» для дисков  $n_B=1,54$  [3]. Максимальные радиальные перемещения буртов крыльчатки составляют 0.16 и 0.1 мм по бурту покрывного и основного дисков соответственно.

В силу того, что в зонах концентрации напряжений отсутствуют пластические деформации, а минимальный запас по пределу текучести составляет 1,25 (по покрывному диску), циклическое нагружение крыльчатки, при запуске и останове двигателя, а также работой на различных режимах по тяге не приводит к появлению и накоплению повреждаемости по модели малоциклового усталости.

Пульсации давления после бустерного насоса окислителя - примерно 2% от статического уровня давления за шнековым преднасосом также не будут определяющими для модели многоциклового усталости ввиду их низкого уровня [4].

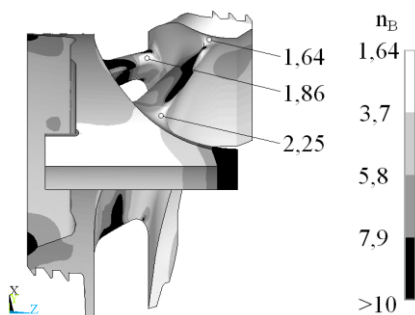


Рис. 4. Расчетный запас по пределу прочности,  $n_B$ .

Таким образом, минимально допустимые «Нормами» запасы прочности и циклическая долговечность крыльчатки, изготовленной из штатного материала, излишне высоки для детали, используемой в двигателе однократного применения. Высокие запасы также подтверждаются положительной статистикой доводочных испытаний двигателя, прошедших без замечаний к

крыльчатке в отношении её циклической и статической прочности.

## **2. Вычисление диапазона МХ материала крыльчатки**

В агрегатах питания ЖРД детали, работающие в криогенном кислороде, изготавливаются из никелевых сплавов. Разброс МХ этих материалов может составлять десятки процентов. К примеру, для никелевых сплавов ЭК61, ЭП741НП и ВЖЛ-14 при криогенной температуре значения модуля упругости лежат в диапазоне от  $2,15 \cdot 10^4$  до  $2,38 \cdot 10^4$  кгс/мм<sup>2</sup>, предела текучести – от  $0,52 \cdot \sigma_B$  до  $0,76 \cdot \sigma_B$ , плотности – от 8,2 до 8,35 г/см<sup>3</sup>.

Исходя из этого поиск минимально допустимого предела прочности материала, при котором будет обеспечен запас прочности по наиболее ответственному элементу крыльчатки – лопаткам,  $n_B=1,76$  (т.к. определено, что при этом запас по прочности в покрывном диске будет больше 1,54), проведён в следующем диапазоне МХ:  $E=2 \cdot 10^4 \dots 2,4 \cdot 10^4$  кгс/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_T=0,5 \cdot \sigma_B \dots 0,8 \cdot \sigma_B$ . При этом величина  $\delta$  принимается равной 15% ввиду её влияния лишь на запас по деформациям, а плотность принимается равной 8,35 г/см<sup>3</sup>.

Перебор механических характеристик в заданном диапазоне, а также итерационное вычисление  $\sigma_B$  методом градиентов автоматизированы с помощью управляющей программы, написанной на языке APDL (ANSYS Parametric Design Language).

Полученные значения  $\sigma_B$  представлены на графике рис. 5. В результате расчетов также определено, что максимальные радиальные перемещения бурта покрывного диска составляют 0,185 и 0,155 мм для минимального и максимального значений  $E$  соответственно, при соотношении  $\sigma_T/\sigma_B \geq 0,57$ .

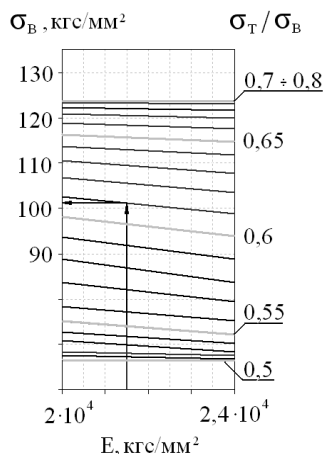


Рис. 5. Диапазон оптимальных МХ материала крыльчатки при обеспечении расчетного значения  $n_B=1,76$

Проверим, подходит ли никелевый сплав, имеющий следующие МХ:  $E=2,15 \cdot 10^4$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_B=105$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_T=64$  кгс/мм<sup>2</sup>, для замены штатного материала?

В соответствии с диаграммой (рис. 5) для  $\sigma_T/\sigma_B=0,61$  минимальное значение  $\sigma_B$ , при котором запас прочности будет удовлетворять «Нормам», равен 100,5 кгс/мм<sup>2</sup> (показано стрелками), что меньше заданного; следовательно данный материал может быть использован вместо штатного.

## Выводы

1. Предложена методика расчета диапазона МХ конструкционных материалов деталей с неизменяемой геометрией, в котором обеспечиваются требуемые нормами запасы прочности.
2. Показано, что минимально допустимые «Нормами» запасы прочности и циклическая долговечность крыльчатки завы-



шены для детали используемой в ЖРД однократного применения.

3. Определён расчетный диапазон механических характеристик материала крыльчатки насоса окислителя, в котором обеспечиваются требуемые «Нормами» запасы прочности.

4. Представленный подход может быть использован для реализации мероприятий направленных на замену конструктивных материалов с целью удешевления производства.

## Литература

1. Чванов В.К. и др. Многодисциплинарное исследование одноступенчатой околзвучковой турбины ЖРД (часть 1) // Труды НПО Энергомаш. М., 2006. №24. С. 4–68.

2. Попов Е.Н., Моделирование пространственного течения жидкости в кислородном насосе ЖРД с учетом кавитации // Труды НПО Энергомаш №27, М.: 2010, С. 65–94.

3. Нормы прочности ЖРД (2-я редакция) // Королёв, 2005. 78 с.

4. Биргер И.А., Шор Б.Ф., Иосилевич Г.Б., Расчет на прочность деталей машин // Справочник. М.: Машиностроение, 1993. 639 с.

Поступила 22.03.2012 г.

Зам. главного редактора:

Л.Е. Стернин

Научно-литературный редактор:

В.К. Старков

Авторы:

А.Е. Милов

В.В. Ткач