

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ НА РЕСУРС ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ГТД

Евдокимов Д. В., Юртаев А. А., Каранаева О. В., Мошков Д. Р.  
Самарский университет, г. Самара, [don.yurtaev2016@yandex.ru](mailto:don.yurtaev2016@yandex.ru)

*Ключевые слова:* лопаточная машина, прочность, прочностной анализ, остаточные напряжения, лопатка, лопатка ГТД, усталостное нагружение, фрезерование, концевое фрезерование, конечно-элементная модель

Остаточные напряжения, формирующиеся в поверхностном слое деталей в процессе механической обработки, оказывают существенное влияние на рабочий ресурс изделия. Широко известный факт, который также упомянут в работах [1, 2], заключается в том, что растягивающие остаточные напряжения снижают рабочий ресурс детали, а сжимающие его увеличивают. Это послужило причиной появления широкого спектра возможных способов упрочнения поверхностного слоя деталей, в результате которых в нём формируются сжимающие остаточные напряжения [2, 3]. Однако, упрочнению предшествует сам процесс изготовления детали, где в подавляющем числе случаев применяются способы механической обработки, приводящие чаще всего к формированию поверхностного слоя с растягивающими остаточными напряжениями [3-5]. Таким образом, исследование эффективности способов и режимов упрочнения поверхностного слоя деталей в зависимости от способов и режимов предшествующей упрочнению механической обработки имеет большую актуальность.

Важным становится разработка методик, позволяющих прогнозировать аналитическим способом ресурс деталей, при возможности учитывать технологическую наследственность, то есть проводить вычисления ресурса деталей с учётом качества поверхностного слоя, сформированного при поверхностном упрочнении, а в свою очередь качество поверхностного слоя на этапах поверхностного упрочнения оценивается при учёте качества поверхностного слоя, полученного на этапах механической обработки. Кроме того, подобные методики могут служить обоснованием к финальному применению поверхностного упрочнения или отказу от него, а также к оптимизации режимов механической обработки и поверхностного упрочнения, что в рамках производства деталей, которое будет проанализировано с помощью подобных методик, позволит снизить его стоимость.

В настоящей работе отражена начальная стадия разработки подобной методики, где исследуется влияние процесса концевого фрезерования на ресурс компрессорной лопатки ГТД, к которой не было применено поверхностное упрочнение. Величина окружных остаточных напряжений при концевом фрезеровании была определена по степенной зависимости [5, 6]:

$$(\sigma_{\tau} - \mu\sigma_0) = 197,6 \cdot \vartheta^{0,107} \cdot S_z^{0,372}, \quad (1)$$

где  $(\sigma_{\tau} - \mu\sigma_0)$  – максимальная величина окружных остаточных напряжений, МПа;  $\vartheta$  – скорость резания, м/мин;  $S_z$  – подача на один зуб фрезы, мм/зуб.

Для исследования влияния остаточных напряжений производился расчёт в программе ANSYS. Для расчёта использовалась модель лопатки последней ступени компрессора среднего давления двигателя НК-25. Полученная по степенной зависимости (1) величина максимальных окружных остаточных напряжений, составившая 44,6 МПа, была задана для поверхностного слоя конечно-элементной модели исследуемой лопатки. Вычисления проводились для частоты оборотов ротора, соответствующей  $\omega = 5000$  об/мин.

В результате расчёта было определено напряжённо-деформированное состояние лопатки компрессора (рис.1), а также был определён запас усталостной прочности, который для лопатки, не имеющей исходное напряжённое состояние в поверхностном слое, составляет 1,63, а с учётом состояния поверхностного слоя, сформированного на этапе концевого фрезерования составляет 0,76.

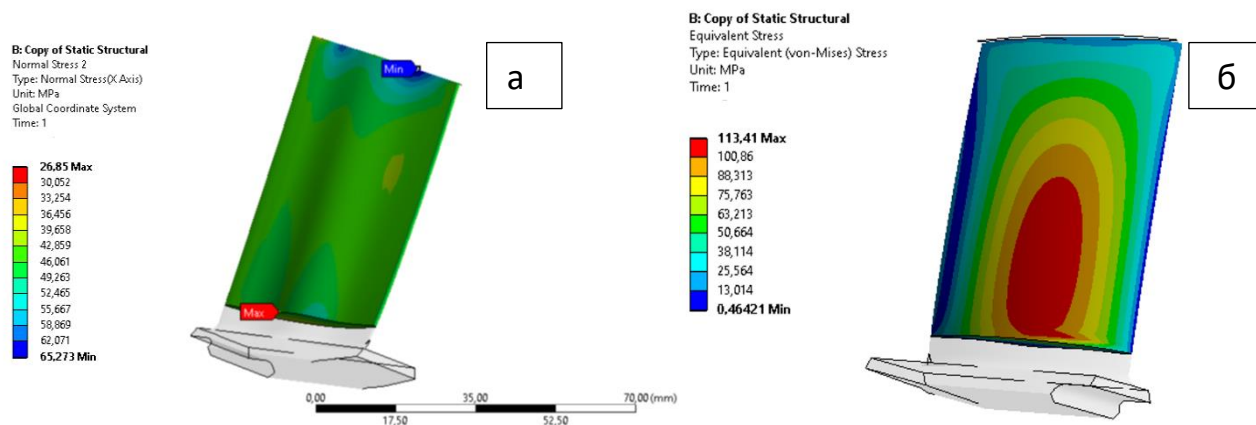


Рис.1 – Распределение исходных остаточных напряжений в поверхностном слое лопатки, сформированных при концевом фрезеровании (а) и напряжённо-деформированное состояние лопатки при воздействии центробежной силы с учётом остаточных напряжений (б)

Для проверки адекватности расчётов, выполненных по конечно-элементной модели, был проведен расчёт по методике, изложенной в работе [7], использующий аналитическую зависимость между остаточными напряжениями и пределом выносливости:

$$\sigma_{-1} = \sqrt{(\sigma_{-1}^*)^2 - (\sigma_0)^2},$$

где  $\sigma_{-1}^*$  – теоретически определенный предел выносливости,  $\sigma_0$  – величина остаточных напряжений,  $\sigma_{-1}$  – фактический предел выносливости.

В результате вычислений по методике [7], были получены следующие значения: коэффициент запаса усталостной прочности, вычисленный без учёта остаточных напряжений составил 1,72, а с учётом остаточных напряжений – 0,93. Следовательно, расхождения между результатами, полученными по конечно-элементной модели и аналитической методике для коэффициента запаса усталостной прочности составили: 18,3% для коэффициента запаса, подсчитанному с учётом остаточных напряжений и 5,6% подсчитанному без их учёта.

Таким образом, в исследовании был найден алгоритм оценки влияния остаточных напряжений на ресурс детали на примере лопатки компрессора ГТД семейства НК. Алгоритм использует конечно-элементную модель, что позволяет быстро производить оценку ресурса детали и как показали исследования, алгоритм имеет хорошую сходимость с аналитической методикой [7].

### Список литературы

1. Акимов В.М. Основы надежности газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1981. 207 с.
2. Букатый А.С. Конечно-элементное моделирование и исследование остаточных напряжений и деформаций деталей после дробеструйного упрочнения / Вестник машиностроения. 2016. №6. С. 52-57.
3. Кравченко Б.А., Митряев К.Ф. Обработка и выносливость высокопрочных материалов. – Куйбышев: Куйбышев. кн. изд-во, 1968. 132 с.
4. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М., Машиностроение, 1975. 344 с.
5. Evdokimov D.V., Skuratov D.L. Improved calculation of the cutting force in end milling / Russian Engineering Research. 2017. №37(7). pp. 642-646.
6. Evdokimov D.V., Skuratov D.L. Dimensions of Cut in Machining by Spiral-Tooth Mills / Russian Engineering Research. 2018. №38(4). pp. 272-277.
7. Остаточные напряжения в металлопродукции: учебное пособие / С. П. Буркин, Г.В. Шимов, Е.А. Андрюкова. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 248 с.

Сведения об авторах

Евдокимов Дмитрий Викторович, ведущий инженер АО “Авиаагрегат”, ассистент кафедры технологий производства двигателей, ассистент кафедры сопротивления материалов. Область научных интересов: оптимизация процессов механической обработки, проведение натуральных экспериментов, разработка математических моделей описания и прогнозирования функциональных параметров процессов механической обработки, составление регрессионных моделей применительно к процессам механической обработки, проектирование и конструирование, с прочностным анализом конструкций нефте-газовой промышленности, авиационной промышленности, режущего инструмента, медицинских имплантов, контейнеров для термообработки изделий.

Юртаев Артём Алексеевич, студент. Область научных интересов: прочностной анализ лопаток ГТД.

Каранаева Оксана Валериевна, к.т.н, доцент. Область научных интересов: механика остаточных напряжений, механика разрушения.

Мошков Дмитрий Русланович, студент. Область научных интересов: прочностной анализ лопаток ГТД.

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF RESIDUAL STRESSES,  
FORMED BY END MILLING  
ON THE RESOURCE OF A COMPRESSOR GTE BLADE**

Evdokimov D.V., Yurtaev A.A., Karanaeva O.V., Moshkov D.R.

Samara National Research University, Samara, Russia, [dmitry.evd.ssau@gmail.com](mailto:dmitry.evd.ssau@gmail.com)

*Keywords: blade machine, strength, strength analysis, residual stresses, blade, GTE blade, fatigue loading, milling, end milling, finite element model*

This work reflects the initial stage of developing a methodology that allows analytically predicting the details resource, taking into account technological heredity, it means that methodology makes it possible to calculate the details resource taking into account the surface layer quality formed during surface strengthening, and the quality of the surface layer at the stages of surface strengthening is assessed taking into account the surface layer quality obtained at the machining stages.