

*Евдокимов Д.В., Еньков И.А., Сивишкин Н.А.,  
Май С., Лунин В.В., Кулаев Е.О.*

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ CAE ПРОГРАММ**

Современное машиностроение становится более сложным из-за деталей, требующих точной обработки. Особенно это важно для авиационных изделий, которые работают при высоких температурах и нагрузках. Ключевое внимание уделяется поверхностному слою, влияющему на надёжность и долговечность изделий. Операции фрезерования играют важную роль, часто являясь последним этапом, на котором обеспечивается точность и шероховатость поверхности. Остаточные напряжения, возникающие на этапе фрезерования, влияют на усталостную прочность и геометрическую точность изделия [1, 2].

В работе демонстрируется применение разработанной методики при оценке влияния остаточных напряжений на геометрическую точность лопатки компрессора газотурбинного двигателя. Важным преимуществом методики является её применимость к деталям, имеющим сложную форму. Также стоит отметить, что методика не требует симуляционного моделирования взаимодействия лопатки и упрочняющей среды, а вместо этого использует готовые эпюры остаточных напряжений как исходные данные.

Для апробации методики была выбрана газодинамическая часть лопатки компрессора, вид на виртуальную модель которой представлен на рис. 1.



Рис. 1. Геометрическая модель газодинамической части лопатки компрессора ГТД

Следующим этапом виртуальная модель лопатки была экспортирована в программный комплекс конечно-элементного анализа. На данном этапе было необходимым разработать конечно-элементную модель лопатки компрессора ГТД таким образом, чтобы была возможность загружать в её поверхностный слой заранее известные эпюры остаточных напряжений. Ввиду данного условия, разработанная конечно-элементная модель приобрела конструктивную особенность, заключающуюся в том, что её поверхностный слой стал состоять из элементов «Solid-shell 190», «Solid-shell 181» и «Solid 95», а её основное тело из «Solid 45». Особенностью конечных элементов поверхностного слоя является их разделение на слои с точками интерполяции, в которых количество слоёв зависит от необходимых точек для эпюры остаточных напряжений. С видом конечно-элементной модели лопатки возможно ознакомиться на рис. 2.

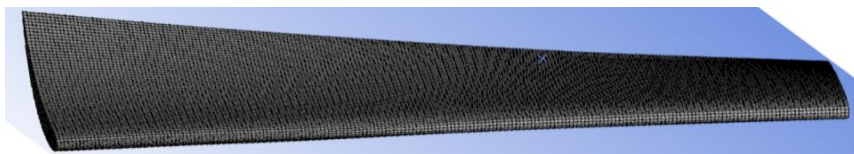


Рис. 2. Конечно-элементная модель газодинамической части лопатки компрессора, созданная в программном комплексе конечно-элементного анализа

Для проведения численного эксперимента по разработанной конечно-элементной модели газодинамической части лопатки

компрессора в её поверхностный слой были загружены эпюры остаточных напряжений, сформированных в поверхностном слое изделий по результату механической обработки фрезой. Данные эпюры были получены в результате использования другой разработанной методики, позволяющей определять знак, величину и характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое изделий на этапах фрезерования.

Методика базируется на конечно-элементной модели, состоящей из двух виртуальных тел: фрезы и заготовки. Данная методика позволяет оценивать знак, величину и характер распределения остаточных напряжений путём построения объёмных эпюр по виртуальному телу заготовки. Высокой точности получаемых результатов позволяет добиться то, что в методике учитывается многофакторность условия формирования остаточных напряжений [3, 4]. Например, использование алгоритмов, приведенных в работе [5] позволяет учесть температуру в зоне резания, а при помощи зависимостей из работы [6] возможно произвести корректировку результатов путём уточнения коэффициентов трения и сил, возникающих в зоне резания.

Точность методики по определению величины, знака и характера распределения остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок была оценена при проведении натурального эксперимента, который показал расхождение получаемых результатов на величину 12,7%. На рис. 3 представлен случайный кадр с изометрическим изображением операции фрезерования, выполняемого при помощи разработанной симуляционной конечно-элементной модели.

Таким образом, в результате загрузки эпюр остаточных напряжений в поверхностный слой конечно-элементной модели лопатки ГТД и дальнейших компьютерных вычислений были получены смещения контрольных сечений профиля лопатки. Полученные результаты показали, что разработанная методика может

быть использована при оптимизации режимов механической обработки с целью достижения точности исполнения размеров, заложенных в конструкторской документации, а также достижения сжимающих остаточных напряжений, которые способствуют увеличению рабочего ресурса изделий.

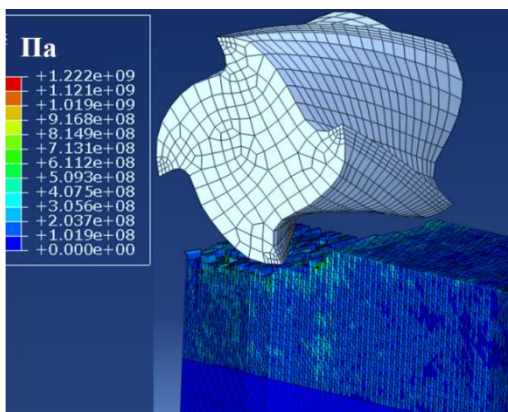


Рис. 3. Конечно-элементная модель процесса резания для определения величины, знака и характера распределения остаточных напряжений

### *Библиографический список*

1. Акимов, В.М. Основы надежности газотурбинных двигателей / В.М. Акимов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 207 с.
2. Швецов, А.Н. Исследование состояния поверхностного слоя заготовок из стали 15Х12Н2МВФАБ-Ш после процесса отделочно-упрочняющей обработки методом алмазного выглаживания / А.Н. Швецов, Д.Л. Скуратов // Сб. научных трудов/Самарский нац. исслед-ий ун-т. – 2021. – С. 211–212.
3. Кравченко, Б.А. Механизм формирования остаточных напряжений при свободном резании закаленных сталей /

Б.А. Кравченко, В.Г. Круцило // Обработка высокопрочных сталей и сплавов инструментами из сверхтвердых синтетических материалов: межвуз. (межвед.) тематич. сб. науч. трудов. – 1980. – №2. – С. 91–97.

4. Кравченко, Б.А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов / Б.А. Кравченко, К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышев. кн. изд-во, 1968. – 132 с.

5. Evdokimov D.V., Skuratov D.L. Influence of tool wear on the heat-flux distribution and temperature at the contact surfaces in the end milling of OT4 titanium alloy // Russian Engineering Research 2016. – Vol. 36. Issue 4. – P. 324–327.

6. Евдокимов, Д.В. Исследование коэффициента трения титановых и инструментальных сплавов. Сухое и граничное трение / Д.В. Евдокимов, М.А. Олейник // Известия СНЦ РАН. – 2020. – Т. 22. – № 1. – С. 43–46.

УДК 621.787:539.319

*Букатый А.С., Фёдоров Д.Г., Санхинес Лесама Ф.,  
Салтанов С.В., Сахаров М.В.*

## **УПРОЧНЕНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ШАССИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**

Упрочнение дробеструйной обработкой приводит к появлению остаточных напряжений в поверхностном слое деталей и, как следствие, технологическим остаточным деформациям (ТОД). При дробеструйном упрочнении деформации осей приводят к увеличению диаметра посадочных поверхностей, превышающих технологические допуски, в связи с чем целью данной работы является прогнозирование