

УДК 621.923

## РАСЧЕТ ПЛОЩАДИ ЗОНЫ КОНТАКТА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЛЕНТОЧНОМ ШЛИФОВАНИИ ЛОПАТОК ГТД

Д. И. Волков<sup>1</sup>, А.А. Коряжкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>rmsi@rgata.ru

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева  
(РГАТУ им. П. А. Соловьева)

Поступило в редакцию 22.07.2013

**Аннотация.** Рассматриваются особенности ленточного шлифования криволинейных крупногабаритных лопаток ГТД на станках с ЧПУ. Приведены математические модели, позволяющие рассчитать изменение параметров контактного взаимодействия инструмента и заготовки. Достигнуто повышение качества поверхности лопаток за счет оптимизации формы контактного элемента.

**Ключевые слова:** ленточное шлифование; прогнозирование качества обработки; расчет параметром зоны контакта.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для изготовления крупногабаритных лопаток вентилятора компрессора распространение получила предварительная обработка проточной части фрезерованием на многокоординатных станках с ЧПУ и окончательная обработка лопатки абразивными лентами, а также алмазными и эльборовыми кругами. Алмазные круги имеют более высокую прочность, стойкость, но ввиду высокой теплонапряженности не обеспечивают постоянство качества по всей поверхности лопатки, и вследствие износа и изменения диаметра дают погрешность прикромочных участков.

Абразивные ленты обеспечивают меньшую теплонапряженность процесса, исключают балансировку, создают в обработанных поверхностях сжимающие остаточные напряжения, кроме того, абразивные ленты выгодно применять в тех случаях, когда поверхность детали невозможно обработать абразивными кругами. В последнее время технология изготовления абразивных лент позволяет получать инструмент высокого качества. Это обусловило преобладание лентошлифовальных станков с ЧПУ для шлифования и полирования криволинейных поверхностей, в том числе и профиль проточной части лопаток ГТД.

### 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Конструкции лентошлифовальных станков непрерывно совершенствуются. Одной из последних разработок в этой области является 6-координатный лентошлифовальный станок Metabo 6NC-1000 (рис. 1).



**Рис. 1.** Рабочая зона 6-координатного лентошлифовального станка Metabo 6NC-1000

Станок имеет шесть управляемых координат, необходимых для установки поверхности ролика, прижимающего абразивную ленту касательно к обрабатываемой поверхности. Процесс разработки программы для станка называется «teach» – обучение. На детали намечают линии и узловые точки, которые будут задавать геометрию лопатки, в этих же точках будут задаваться режимы шлифования. Можно програм-

мировать до десяти линий и до десяти точек в каждой линии.

Перемещения прижимного ролика относительно детали рассчитываются системой УЧПУ таким образом, чтобы поддерживать постоянными шаг между строчками  $S_c$  и скорость подачи детали  $v_d$ . Деталь в процессе обработки совершает вращательные движения  $A$  вокруг координатной оси станка  $X$ , перемещается относительно ролика в направлениях  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . При этом шлифовальная бабка станка с прижимным роликом, несущим абразивную ленту, имеет возможность поворота  $B$  и  $C$  вокруг координатных осей  $Y$  и  $Z$ . То есть деталь и инструмент имеют возможность одновременного перемещения друг относительно друга в шести координатах, управляемых одновременно УЧПУ станка. При этом лента движется со скоростью  $v_l$ , регулируемой от 5 до 20 м/с. В результате этого проточная часть лопатки формируется при шлифовании в виде строчек, шириной  $S_c$  и глубиной, определяемой соотношением режимных параметров – силы прижатия  $P$  ролика 2 к детали 1.

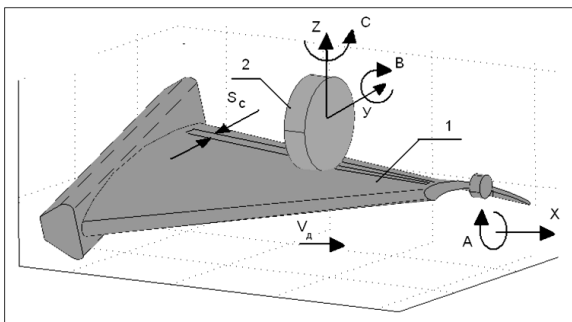


Рис. 2. Схема осуществления ленточного шлифования лопаток ГТД

Прижим ролика к обрабатываемой поверхности происходит при дополнительном поступательном перемещении, осуществляемом под действием веса узла, несущего прижимной ролик и лентопотяжной механизм. Сила прижима плавно изменяется в пределах от 50 до 450 Н при помощи пневмоцилиндра, создающего силу, направленную противоположно весу узла прижимного ролика. Для подавления вибраций во время обработки и исключения ударов узел прижимного ролика связан также с демфирующим устройством.

Станки данного типа должны обеспечивать постоянный съем металла по всему профилю лопатки и получение поверхности постоянного (заданного по чертежу) качества. Но процесс ленточного шлифования деталей сложной про-

странственной формы имеет ряд характерных отличий от процесса шлифования деталей с более простой геометрической формой. Одно из особенностей процесса – это постоянно изменяющаяся в процессе обработки площадь зоны контакта, которая зависит от деформаций контактного элемента в процессе обработки [1–5].

В связи с этим данная работа посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям кантатного взаимодействия инструмента и детали при полусвободном методе строчечного ленточного шлифования с целью повышения точности и качества изготовления лопаток ГТД.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

До настоящего времени процесс составления УП для лентошлифовального оборудовании такого типа производился без учета изменения площади зоны контакта.

Отсутствие теории, практических рекомендаций и методик, необходимых для получения требуемой точности и качества обработанных поверхностей на многокоординатных лентошлифовальных станках приводит к прямой зависимости качества обработки от квалификации оператора.

В связи с этим была разработана методика расчета площади зоны контакта для процесса ленточного шлифования, имеющая целью прогнозирование выходных характеристик процесса шлифования сложнопрофильным эластичным контактным инструментом поверхностей сложной геометрической формы.

Данная методика базируется на использовании следующих моделей:

- модель движений многокоординатного лентошлифовального станка с учетом упругих свойств технологической системы, позволяющая прогнозировать положение инструмента относительно обрабатываемой детали в любой момент времени [4];

- модель деформации контактного элемента и заготовки сложной формы, позволяющая рассчитать площадь зоны контакта, профиль контактного инструмента в зоне контакта, распределение давления по перу лопатки в любой момент времени.

## 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Сложная геометрия заготовки и инструмента не позволяет рассчитать деформации аналитическими методами. Для решения этой задачи предлагается использовать математическое моделирование в программном пакете моделирования в системе DEFORM 3D. Данный пакет

реализует трехмерное геометрическое моделирование на базе «твердотельной» модели с помощью метода МКЭ. В основу МКЭ положено разбиение сплошной среды (в частности, объема деформируемого тела) на множество простых геометрических элементов (плоские элементы: прямолинейные и криволинейные, правильные и произвольные треугольники и четырехугольники; объемные элементы: прямолинейные и криволинейные четырехгранники и шестигранники). Элементам в целом и каждому узлу в частности придают определенные степени свободы, а каждый элемент обладает свойствами материала дискретизированной среды. Для упругопластических материалов это прежде всего механические свойства деформируемой среды. Корректная модель в МКЭ максимально приближена к конкретному физическому процессу.

Для решения поставленной задачи создаем твердотельную модель заготовки и контактного ролика (рис. 1) в системе FEMLab.

Для ленточного шлифования используется широкая номенклатура зубчатых контактных роликов, различающихся по размерам, отношению ширины зубца к ширине паза, числу зубьев, углу наклона зуба (рис. 3).

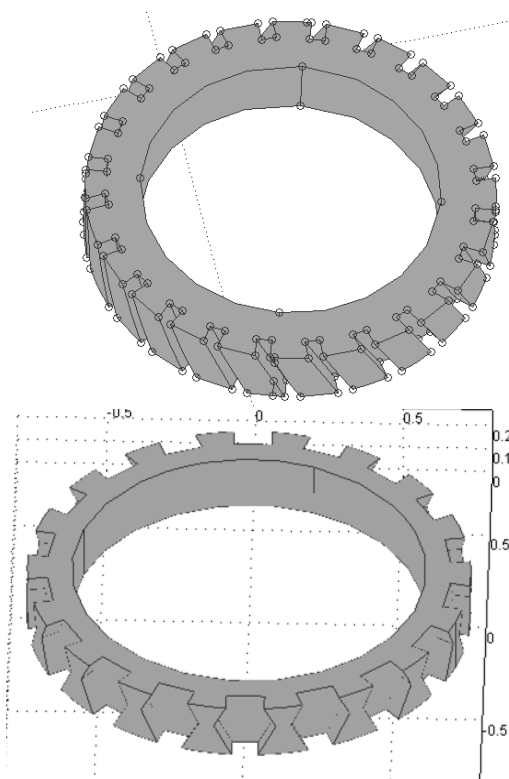


Рис. 1. Твердотельные модели контактных роликов

Следующий шаг – разработка схемы расчета, которая бы отражала особенности деформации ролика в процессе обработки лопатки. По-

скольку ролик в процессе деформации совершает вращательное движение и возникает тангенциальная сила, которая сказывается на деформациях упругого слоя ролика, то предлагается приложить к алюминиевой основе контактного ролика (рис. 4) силу резания  $P_y$ , перемещение вокруг оси со скоростью  $V_k$  и перемещение в направлении подачи со скоростью  $V_{ст}$ .

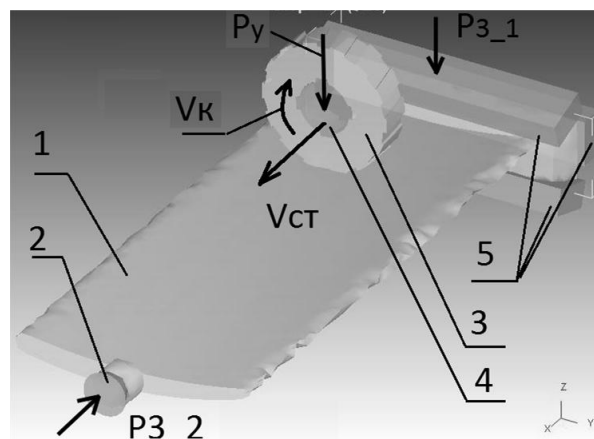


Рис. 2. Схема расчета деформаций упругого элемента ролика

При задании граничных условий производится лишение степеней свободы твердых тел системы. Ввиду значительно большей жесткости материала корпуса рассматривается только упругий слой ролика, а корпус считается абсолютно жестким. Поэтому упругий слой жестко закрепляется по внутренней поверхности. Лишение степеней свободы лопатки производится в соответствии со схемой базирования. При установке лопатки в приспособление производится жесткое закрепление за замок и поджим осевой силой с помощью центра. Такую схему можем смоделировать следующим образом: замок лишается трех степеней свободы, а бобышка с центровым отверстием – двух.

Учитывая сложность геометрии рассчитываемых тел, применяем метод конечных элементов. Геометрию тел разбиваем на совокупность элементов простой формы (рис. 3).

Из расчета деформации профиля ролика (рис. 5, 6) и лопатки в процессе обработки определяются размеры зоны контакта и распределение давления на абразивную ленту.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Используя возможности современной вычислительной техники и перечисленные модели, удалось рассчитать площадь зоны контакта вращающегося контактного элемента относительно заготовки. Для оценки адекватности раз-

работанной модели было произведено сравнение величин площадей зоны контакта, полученных экспериментально, и результатов моделирования в DEFORM (рис. 6).

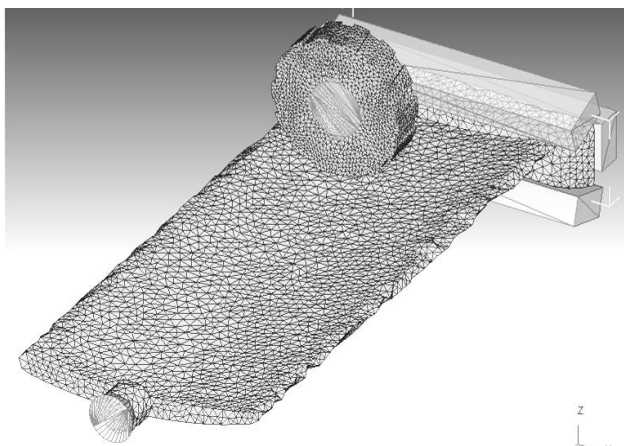


Рис. 3. Модели лопатки и контактного элемента, разбитые на конечные элементы

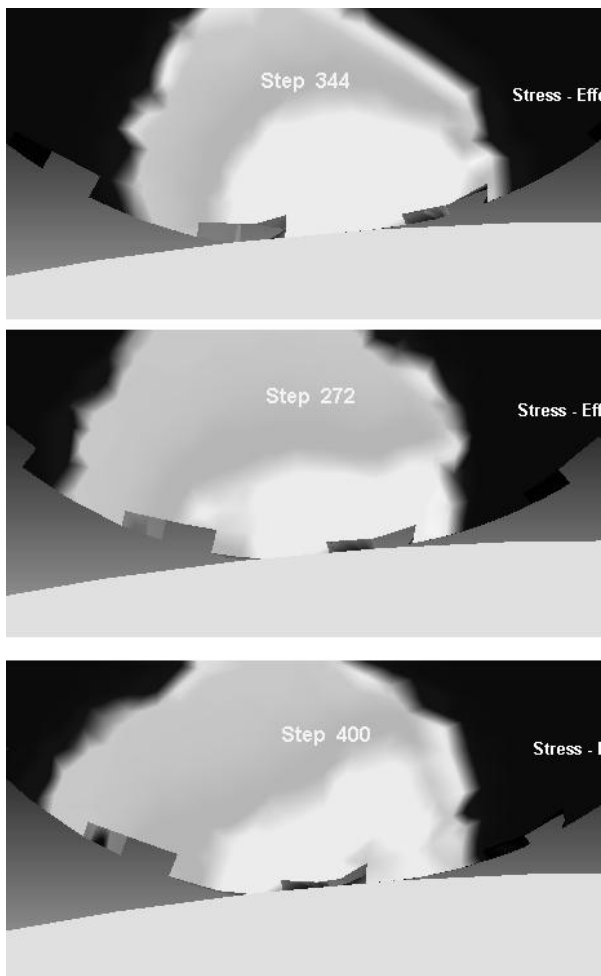


Рис. 4. Результаты расчета деформаций профиля вращающегося ролика (зубчатый ролик) относительно лопатки



Рис. 5. Результаты расчета деформаций профиля вращающегося ролика (гладкий ролик) относительно лопатки

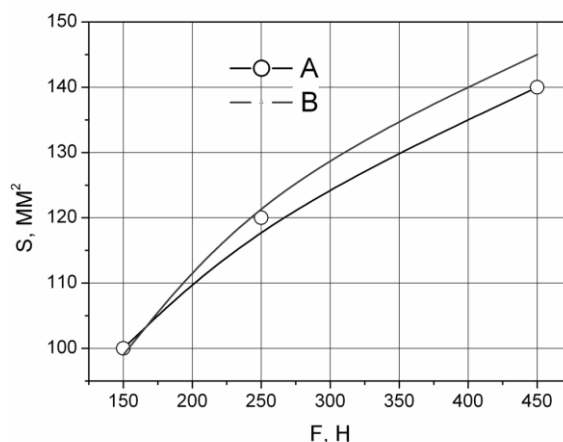


Рис. 6. Площадь контакта ролика: твердость 70 Hsh, толщина резинового слоя  $h = 20$  мм, диаметр ролика  $D = 150$  мм: A – экспериментально; B – рассчитана в системе DEFORM

Сопоставление расчетных значений с экспериментальными показало незначительное отличие в пределах 8..11 %.

При оптимизации условий обработки на основе модели деформаций контактного элемента и заготовки в процессе ленточного шлифования могут быть рассчитаны значения размеров зоны контакта и давлений при различных сочетаниях режимных параметров. Варианты, соответствующие оптимальным значениям выходных параметров, можно отыскивать с помощью какого-либо метода оптимизации.

## ВЫВОДЫ

1. Предлагаемая модель расчета деформаций заготовки и инструмента при ленточном шлифовании криволинейных поверхностей деталей ГТД позволила учесть сложную геометрическую форму инструмента и заготовки и рассчитать параметры контактного взаимодействия для любого момента времени.

2. Предлагаемая модель позволила проводить компьютерную визуализацию процесса ленточного шлифования криволинейных деталей с последующим решением задачи выбора рациональной кинематической схемы обработки, конструкции и характеристик инструмента на стадии проектирования исходя из заданных эксплуатационных параметров обработанной поверхности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков Д. И., Коряжкин А. А. Разработка модели абразивной ленты, учитывающей стохастические факторы // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2010. № 6. С. 28–35.
2. Фельдман Е. Ю., Юнусов Ф. С. Бескопирное шлифование крупногабаритных фасонных деталей Казань: Казанск. гос. техн. ун-т, 1999. 155 с.
3. Юнусов Ф. С., Фельдман Е. Ю. Бескопирное шлифование крупногабаритных фасонных деталей Казань, 1999. 155 с.
4. Коряжкин А. А., Михрютин В. В. Повышение точности ленточного шлифования широкохордных лопаток компрессора ГТД на станках с ЧПУ // *Справочник. Инженерный журнал*. 2008. № 7. С. 7–11.
5. Поletaev В. А., Михрютин В. В., Коряжкин А. А. Ленточное шлифование крупногабаритных лопаток газотурбинных двигателей на станках с ЧПУ // *Справочник. Инженерный журнал*. 2005. № 12. С. 7–11.

#### ОБ АВТОРАХ

**ВОЛКОВ Дмитрий Иванович**, зав. каф. резания материалов, станков и инструментов им. С. С. Силина. Дипл. инж.-мех. (РАТИ, 1976). Д-р техн. наук (РАТИ, 1997). Проф. Иссл. в обл. глубинного шлифования.

**КОРЯЖКИН Андрей Александрович**, доц. каф. резания материалов, станков и инструментов им. С. С. Силина. Дипл. инженер. Канд. техн. наук. Иссл. в обл. ленточного шлифования.

#### METADATA

**Title:** Calculation of area of contact zone of finite element method with grinding blades GTE.

**Authors:** D. I. Volkov and A. A. Koryazhkin.

**Affiliation:** Rybinsk State Aviation Technical University named after P. Solovyov.

**Email:** rmsi@rgata.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 17, no. 8 (61), pp. 51-55, 2013. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The features of belt grinding of large curved blades of gas turbine engines on CNC machines. The mathematical model allowing to calculate the change in the parameters of contact interaction of the tool and the workpiece. Achieved by improving the quality of the superficiality of the blades by optimizing the catenary element.

**Key words:** belt grinding; forecasting quality of treatment; contact zone parameter calculation.

#### References (English transliteration):

1. D. I. Volkov and A. A. Koryazhkin, "Development Model of the abrasive belt, taking into account the stochastic factors," *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. no. 6, pp. 28-35, 2010.
2. E. Y. Feldman and F. S. Yunusov, *Beskopirnoe grinding large fittings*. Kazan: Kazan State. Tech. Univ. Press, 1999.
3. F. S. Yunusov and Y. A. Feldman, *Beskopirovalnoe grinding large fittings*. Kazan, 1999.
4. A. A. Koryazhkin and V. V. Mihryutin, "Improving the accuracy of wide belt grinding turbine engine compressor blades CNC," *Directory. Engineering Journal*, no. 7, pp. 7-11, 2008.
5. V. A. Poletaev, V. V. Mihryutin, and A. A. Koryazhkin, "Belt grinding of large gas turbine engine blades CNC," *Directory. Engineering Journal*, no. 12, pp. 7-11, 2005.

#### About authors:

**VOLKOV, Dmitry Ivanovich**, Head. cutting of materials, machines and tools dept. Dipl. Mech. Engineer (RATA, 1976). Dr. Tech. Sciences (RATA, 1997).

**KORYAZHKIN, Andrey Aleksandrovich**, Cand. Tech. Sciences, Dozent, Head Rezaniya Materials, Machines and Tools Dept.