

А. А. Коряжкин

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЛЕНТОЧНОГО ШЛИФОВАНИЯ НА МНОГОКООРДИНАТНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

Рассматриваются особенности ленточного шлифования лопаток ГТД на станках с ЧПУ. Приведены математические зависимости для получения профиля обработанной поверхности. Достигнуто повышение точности обработки при сохранении требуемого качества поверхностного слоя. *Ленточное шлифование; методика оптимизации*

В качестве одной из окончательных операций обработки проточной части крупногабаритных лопаток ГТД широкое распространение получил полусвободный метод строчечного ленточного шлифования. Данный метод основан на движении обката эластичным абразивным инструментом криволинейной обрабатываемой поверхности и не способен исправлять погрешности обработки, возникшие на предыдущих операциях. Основная рациональная область применения данного метода сводится к улучшению качества обрабатываемой поверхности. Таким образом, актуальность «безразмерного» метода строчечного ленточного шлифования как окончательного способа обработки значительно снижается [2, 3]. На практике возникает острая необходимость в реализации способа обработки, позволяющего исправлять погрешности обработки после предыдущих операций.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В настоящее время в качестве предварительной обработки проточной части лопатки используются операции фрезерования на многокоординатных станках с ЧПУ. В качестве окончательной обработки используются операции шлифования на многокоординатных лентошлифовальных станках с ЧПУ (рис. 1). Одним из последних представителей этой группы станков является лентошлифовальный станок Metabo 6NC-1000. Станок имеет шесть управляемых координат, необходимых для установки инструмента по нормали к обрабатываемой поверхности, и предназначен для обработки криволинейных крупногабаритных деталей с длиной проточной части 250...1000 мм, хордой 100...300 мм, $C_{\max}=2,5...7$ мм, $C_1=0,5...2,5$ мм, $C_2=0,8...3$ мм.



Рис. 1. Шестикоординатный лентошлифовальный станок Metabo 6NC – 1000

Схема осуществления процесса ленточного шлифования на многокоординатном оборудовании приведена на рис. 2.

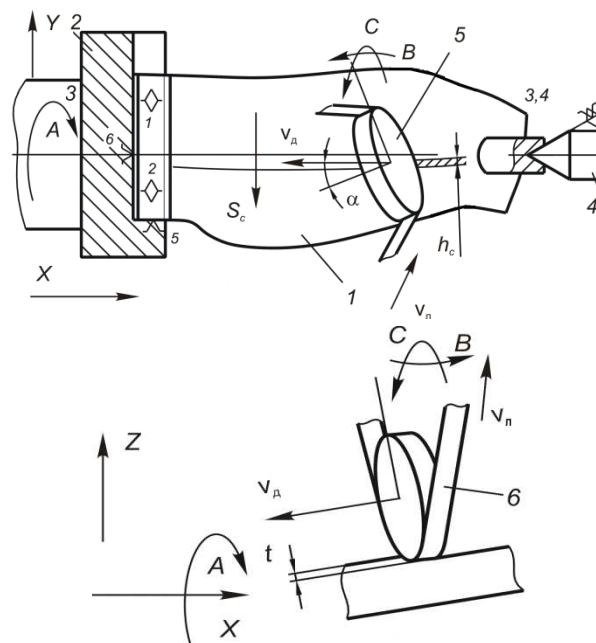


Рис. 2. Схема осуществления ленточного шлифования лопаток ГТД

При осуществлении процесса обработки лопатка 1, установленная на планшайбе 2 и в центрах 4, перемещается вдоль оси X со скоростью V_d и поворачивается вокруг этой оси с переменной скоростью для обеспечения положения ролика по нормали к обрабатываемой поверхности в точке контакта. Ролик 5 с абразивной лентой 6 перемещается вдоль осей Y, Z и вокруг этих осей поворачивается в соответствии с геометрией детали.

В результате этого проточная часть лопатки формируется в виде строчек шириной h_c и глубиной t .

Для подобных станков управляющие программы составляются с целью максимального приближения получаемого профиля к теоретическому. От этого зависят доработки на последующих операциях ручного полирования, которые должны быть полностью исключены или сведены к минимуму, т. е. технологический процесс выполнения операции шлифования во многом определяет трудозатраты на изготовление детали в целом.

В существующем технологическом процессе шлифования операционный контроль происходит от одних и тех же технологических баз. В качестве таких баз в зависимости от конструкции лопатки используют три центровые фаски или замок лопатки и центровую фаску на технологической бобышке со стороны проточной части. В зависимости от габаритных размеров деталь помещают в прибор ПОМКЛ – 4 или контрольные приспособления, где отклонения замеряют с помощью шаблонов (рис. 3). При этом одновременно осуществляют комплексный контроль геометрических размеров профиля:

- смещение профиля от корневого сечения лопатки;
- смещение профилей лопатки друг относительно друга в том или ином сечении;
- угол разворота профиля в каждом сечении.

Наличие жестких допусков на каждый контролируемый параметр приводит к необходимости доработки проточной части. Большое количество одновременно контролируемых параметров и последующая доработка профилей значительно увеличивают трудоемкость обработки. Основными причинами отклонения профиля лопатки от теоретического являются:

- влияние «технологической наследственности»;
- колебания припуска, созданные на предыдущей операции, вследствие деформации лопатки при фрезеровании, которые повторяются на окончательно обработанной поверхности;

патки при фрезеровании, которые повторяются на окончательно обработанной поверхности;

- износ ленты приводит к постепенному уменьшению съема материала в процессе обработки, при этом погрешность обработки по лопатке может достигать при черновом шлифовании $\delta = 0,15-0,25$ мм, при чистовом $\delta = 0,05-0,1$ мм;
- при обработке выпуклых и вогнутых участков различной кривизны изменяется площадь поверхности контакта ленты и лопатки, что приводит к изменению контактного давления при постоянном усилии прижима в диапазоне $\pm 20\%$ от номинального, а это приводит к колебаниям снимаемого припуска;
- инерционность подвижных узлов станка приводит к изменениям прижимающего усилия и неравномерному съему металла на участках резкого изменения траектории;
- при обработке прикромочных участков происходит уменьшение площади зоны контакта ввиду ограниченности заготовки, это приводит к увеличению удельного давления в зоне контакта, в результате происходит повышение глубины съема и «зарезание» кромки.

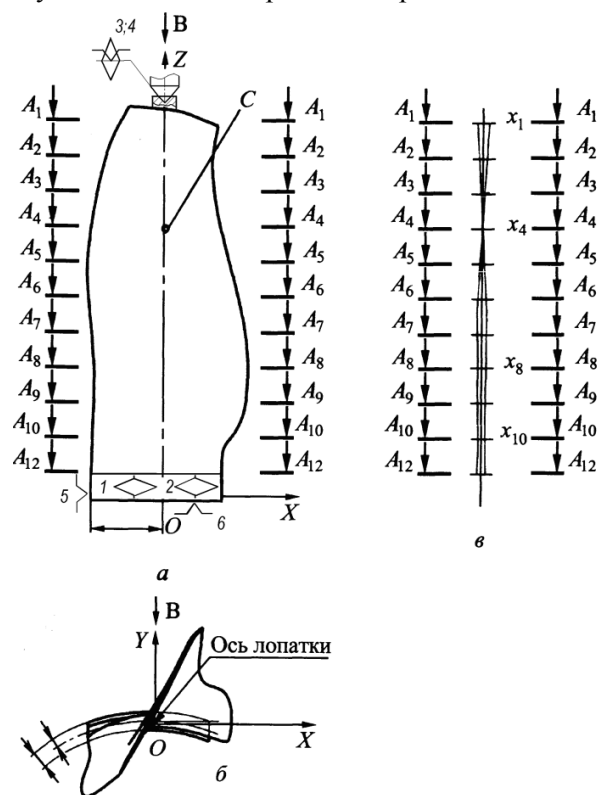


Рис. 3. Чертеж типовой лопатки вентилятора КНД: а – чертеж проточной части; б – чертеж проточной части вид В, в – схема позиционных допусков $x_1 \dots x_{12}$ по оси пера лопатки в сечениях $A_1 \dots A_{12}$

В связи с этим, данная работа посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям полусвободного метода строчечного ленточного шлифования с целью повышения точности изготовления лопаток ГТД.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

До настоящего времени процесс обработки на ленто-шлифовальном оборудовании производился в следующей последовательности. Рабочий, выполняющий данную операцию, накладывал шаблон на проточную часть лопатки и размечал ее. После снятия шаблона на детали оставались замаркированные точки. В отмеченных точках осуществляли замер толщины лопатки в том или ином сечении. Сравнивая фактические значения толщины лопатки в каждой точке с требованиями чертежа, определяли фактическую величину припуска, которую требуется снять в каждой отмеченной точке до достижения заданного чертежом размера. После чего разрабатывали схему снятия припуска со стороны спинки (т. е. с необработанной стороны). Она заключалась в занесении в устройствах с числовым программным управлением (УЧПУ) станка управляющей программы, предусматривающей необходимое количество переходов и размеров обрабатываемой поверхности, обрабатываемой при каждом переходе (рис. 4).

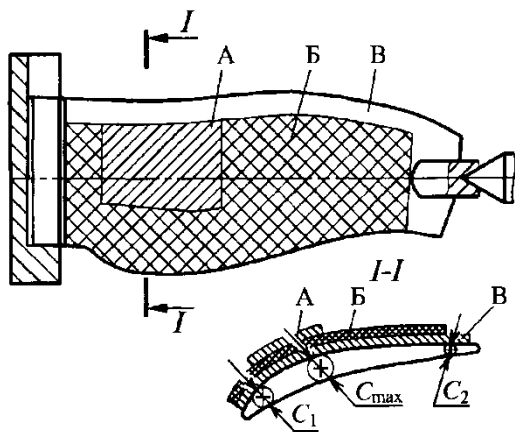


Рис. 4. Схема снятия припуска со стороны спинки

Затем деталь устанавливалась на технологические базы в приспособление станка (в планшайбу и в задний центр) и шлифовалась. При этом обработка велась не по всей поверхности детали, а участками. Сначала снимался наиболее выступающий участок А, затем участок Б, в качестве окончательной вводилась программа, предусматривающая обработку всей поверхности В.

Таким образом, при данном техпроцессе, для каждой конкретной лопатки необходимо каждый раз производить разработку стратегии снятия припуска, которая сводится к определению числа проходов, к заданию области шлифования и режимов шлифования с первого прохода до прохода, окончательно формообразующего профиль проточной поверхности лопатки. Это значительно увеличивает трудоемкость операции.

Также необходимо отметить, что обработка прикромочных участков происходит без перебега инструмента с целью исключения брака («зарезания» кромки). Доработку краевого участка 3 осуществляют вручную (рис. 5), что существенно увеличивает трудоемкость операции ручной полировки.

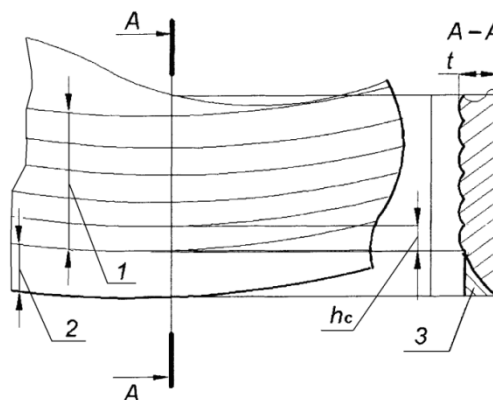


Рис. 5. Схема осуществления обработки пика и прикромочного участка: 1 – зона обработки с перекрытием; 2 – краевая область профиля лопатки; 3 – зона доработки

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

В связи с этим была разработана методика оптимизации процесса ленточного шлифования, имеющая целью снижение отклонений профиля проточной части обработанной лопатки от теоретического профиля, заданного по чертежу, и обеспечения требуемого качества поверхностного слоя.

Данная методика базируется на использовании следующих моделей:

- модель движений многокоординатного ленто-шлифовального 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 распределение давления по перу лопатки в любой момент времени [4];

- модель формообразования поверхности, позволяющая учитывать не только форму зерен, их размеры, ориентацию в пространстве, но и сложное движение зерна в зоне контакта, обусловленное упругими свойствами инструмента, микро- и макропрофилем обрабатываемой поверхности.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе оптимизации опорные точки, в которых пишется управляющая программа, расставлялись через равные промежутки. Далее производили моделирование процесса обработки. Для моделирования относительного перемещения инструмента и заготовки использовали формулу структурной компоновки как средство формализации движений звеньев станка. Формула структурной компоновки для станка Metabo 6NC – 1000 имеет вид $AXOYZBC(A1A2)a$. Основные поступательные движения вдоль координатных осей обозначались X, Y, Z , вращение вокруг соответствующих осей – A, B, C . Матрица перехода определялась в соответствии с данной структурной формулой [1, 4].

При решении задачи моделирования взаимного положения инструмента и детали нумерация узлов производилась от детали к инструменту, в точном соответствии с формулой структурной компоновки. Инерционность оборудования учитывалась за счет составления дифференциальных уравнений второго порядка, учитывающих массу подвижного узла, демпфирующую способность, жесткость упругих элементов, кинематику перемещения [4]. Деформация контактного элемента и лопатки определялась методом конечных элементов в среде Femlab 3.5.

Таким образом, используя модель перемещения инструмента и модели расчета деформации контактного элемента и лопатки, были получены координаты центра контактного ролика относительно лопатки и распределение давления по профилю лопатки в любой момент времени [4].

Траектория движения зерен описывается с помощью системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} m_{zi} \cdot \ddot{x}_i + h \cdot \dot{x}_i + c_x \cdot (x_i - x_{0i}) &= P_{x-i} \\ m_{zi} \cdot \ddot{y}_i + h \cdot \dot{y}_i + c_y \cdot (y_i - y_{0i}) &= P_{y-i} \\ m_{zi} \cdot \ddot{z}_i + h \cdot \dot{z}_i + c_z \cdot (z_i - z_{0i}) &= P_{z-i} \end{aligned} \quad (1)$$

где m_{zi} – масса i -го зерна, г; h – коэффициент демпфирования, Н·с/м; $P_{x-i}, P_{y-i}, P_{z-i}$ – составляющие сил резания, действующие на единичное зерно, Н; c_x, c_y, c_z – составляющие жесткости абразивного зерна в ленте, Н/мм; x_i, y_i, z_i – действительные координаты i -го зерна, м; x_{0i}, y_{0i}, z_{0i} – координаты обусловленные траекторией движения i -го зерна без учета упругих свойств, м

$$\begin{pmatrix} x_{0i} \\ y_{0i} \\ z_{0i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{n-i} \\ y_{n-i} \\ z_{n-i} \end{pmatrix} M(\tau), \quad (2)$$

где $x_{n-i}, y_{n-i}, z_{n-i}$ – координаты в начальный момент времени (расположение на ленте) i -го зерна, м; матрица перехода определяется в соответствии со структурной формулой станка, на котором происходит обработка.

Координаты положения зерна в абразивной ленте x_{n-i} и z_{n-i} задавались с использованием генератора случайных чисел как случайная величина, причем координата x_{n-i} в интервале $(-H/2; H/2)$, длина которого равна ширине абразивной ленты, а z_{n-i} в интервале $(-l/2; l/2)$ длина которого равна длине абразивной ленты l . Координата, отвечающая за разновысотность зерен y_{n-i} , задавалась как случайная величина с использованием градиента изменения плотности зерен в переходном слое

$$C_v(y) = \frac{K_c \omega_v}{Z_k} \exp\left(\frac{-K_c y}{Z_k}\right), \quad (3)$$

где ω_v – объемная плотность зерен, примыкающих к тканевой основе, $1/\text{м}^3$; K_c – коэффициент пропорциональности, определялся экспериментально для каждой марки и зернистости ленты.

С целью получения профиля обработанной поверхности была разработана схема снятия припуска единичным абразивным зерном, которая заключается в вычитании области материала, ограниченной профилем зерна и заготовки.

Параметры a и b , определяющие точки пересечения профилей зерна, заданного кусочно-аналитической функцией $f_3(ta_3, tb_3, S_{xi}, S_{yi})$, и заготовки $f_{II}(ta_{II}, tb_{II})$, определялись из уравнения

$$f_3(ta_3, tb_3, S_{xi}, S_{yi}) = f_{II}(ta_{II}, tb_{II}), \quad (4)$$

где S_{xi}, S_{yi} – смещения зерна для двух соседних положений, м; $ta_3, tb_3, ta_{II}, tb_{II}$ – параметры уравнений, определяющие точки пересечения, мм.

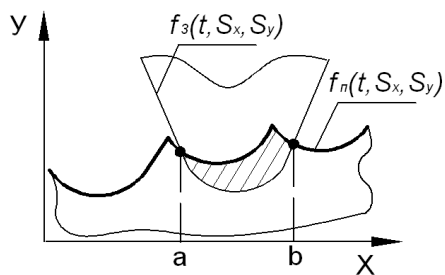


Рис. 6. Схема снятия припуска единичным абразивным зерном

Уравнение для расчета микропрофиля получаемой детали поперек движения абразивных зерен задавалось функцией

$$f_{II}(t) = \begin{cases} f_{II}(t), t \in [0, taj] \\ f_3(t, S_{xi}, S_{yi}), t \in [taj, tbj] \\ f_{II}(t), t \in [tbj, tl], \end{cases} \quad (5)$$

где tl – параметр, определяющий длину профиля заготовки, мм.

Микрогеометрия смоделированной поверхности (рис. 8), получаемая поперек движения абразивных зерен, использовалась для расчетов глубины съема и показателей качества детали.

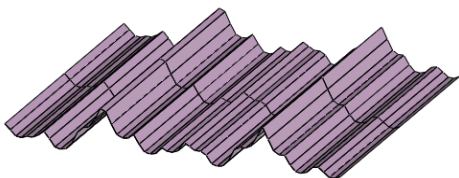


Рис. 7. Микропрофиль обработанной поверхности

После получения профиля смоделированной поверхности производилось сравнение с требуемым профилем, заданным по чертежу. Определялась погрешность обработки в интересующих нас сечениях, далее согласно методике, описанной в работе [4], с использованием алгоритма выравнивания погрешности, основанного на управлении изменениями давления [4], пересчитывали расстояние между опорными точками. Применение алгоритма выравнивания погрешности позволило лишь частично выровнять размер получаемой детали. Полное исправление неравномерности осуществлялось за счет изменения скорости движения ленты V_l пропорционально снимаемому припуску, с последующей коррекцией учитывающей износ ленты. Параметры износа ленты, которые взаимосвязаны с режимами шлифования, определялись из работы [5].

Методика назначения режимов шлифования с целью выравнивания глубины снимаемого припуска прикромочного участка сводится к следующему – при традиционной схеме ленточного шлифования с перебогом на постоянных режимах сечение среза можно в первом приближении считать постоянным, т. е. $S_n = S_{n-1} = S_{n-2}$.

Вследствие этого, учитывая уменьшение длины сечения среза и увеличение давления, происходит «зарезание» кромки лопатки.

При оптимизации схемы шлифования назначали контактное усилие P_y , исходя из требуемого сечения среза, находимого из условия наименьшей погрешности обработки.

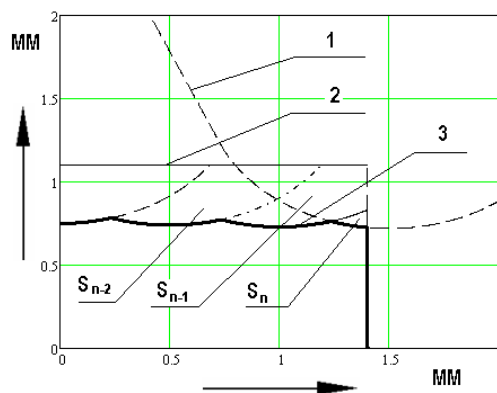


Рис. 8. Микрогеометрия смоделированной поверхности детали

Усилие прижима P_y рассчитывали из условия сохранения постоянного удельного давления $P_{уд}$, с целью сохранения требуемой нагрузки на абразивные зерна. Для расчета P_y использовали выражение

$$P_y = P_{уд} \cdot B \cdot l_{и}, \quad (6)$$

где $l_{и}$ – длина участка контакта инструмента и заготовки, мм; B – ширина контактного элемента, мм.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Используя возможности современной вычислительной техники и перечисленные модели, на основе алгоритмов выравнивания погрешности и алгоритма снижения погрешности была повышена точность обработки.

Повышение точности базируется на управлении съемом за счет оптимизации траектории движения инструмента, управления процессами контактного взаимодействия инструмента с заготовкой.

ВЫВОДЫ

1. Предлагаемая модель ленточного шлифования криволинейных поверхностей деталей ГТД позволила учесть расположение и геометрическую форму абразивных зерен для любого момента времени. При моделировании рабочей поверхности ленты применялся вероятностный метод.

2. Разработанная методика оптимизации процесса ленточного шлифования позволила определить режимы обработки, соответствующие достижению наименьшей погрешности обработки профиля пера лопатки и прикромочных участков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воробьев Е. И., Попов С. А., Шевелева Г. И.** Механика промышленных роботов: в 3 кн.; Кн 1: Кинематика и динамика. М.: Высшая школа, 1988. 304 с.

2. **Фельдман Е. Ю., Юнусов Ф. С.** Бескопирное шлифование крупногабаритных фасонных деталей. Казань: Изд-во Казанск. гос. техн. ун-та, 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 // Инженерный журнал. 2008. № 7. С. 7–11.

5. **Полетаев В. А., Михрютин В. В., Коряжкин А. А.** Ленточное шлифование крупногабаритных лопаток газотурбинных двигателей на станках с ЧПУ // Инженерный журнал. 2005. № 12. С. 7–11.

ОБ АВТОРЕ

Коряжкин Андрей Александрович, доц. каф. резания материалов, станков и инструментов им. С. С. Силина РГАТА имени П. А. Соловьева. Канд. техн. наук. Иссл. в обл. ленточного шлифования.