

УДК 621.92

## АНАЛИЗ СХЕМ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЭВОЛЬВЕНТНОГО ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБОРЕЗНЫХ ДОЛБЯКОВ

Е. В. Васильев<sup>1</sup>, Ю. Р. Нуртдинов<sup>2</sup>, А. Ю. Попов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>wasilyev\_@mail.ru, <sup>3</sup>popov\_a\_u@list.ru

ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ)

Поступила в редакцию 27.08.2013

**Аннотация.** Различные схемы формообразования эвольвентной поверхности зуборезных долбяков анализируются с точки зрения производительности шлифования, точности профиля и качества обработанной поверхности. Рассматривается общепринятая методика замены эвольвенты на радиус окружности, который можно вписать в эвольвентный профиль не более чем по трем точкам теоретического профиля, что является одной из основных причин низкой точности профиля при методе копирования. Для увеличения точности эвольвентного профиля при изготовлении зуборезных долбяков по методу фасонного шлифования, предлагается внедрить способ правки и профилирования шлифовального круга шлифованием с использованием замены эвольвентного профиля эллипсом. Замена эвольвенты эллипсом позволяет вписать в теоретический профиль эвольвенты пять и более точек, лежащих на теоретическом профиле.

**Ключевые слова:** шлифование; долбяк; центроида; эвольвента.

Детали современных авиадвигателей работают в условиях повышенных нагрузок и высоких температур. Поэтому они должны быть высокого качества, долговечны, надежны, иметь малый вес при сохранении необходимых прочностных характеристик. Выполнение этих условий требует применения новых современных материалов. Такими материалами, в настоящее время широко применяемыми в моторостроении, являются жаропрочные и титановые сплавы, высокопрочные и жаростойкие стали. Применение данных материалов создает большие трудности, связанные с их лезвийной обработкой. В особенности это относится к нарезанию шлицевых отверстий дисков авиационных турбореактивных двигателей и шлицевых втулок. Конфигурация этих деталей требует применения в качестве инструмента только зуборезные долбяки [1]. Традиционно зуборезные долбяки изготавливаются из быстрорежущих сталей нормальной теплостойкости. Обработка современных авиационных материалов данным инструментальным материалом не целесообразна, т.к. стойкости дорогостоящего инструмента не всегда хватает для обработки одной заготовки. Кроме того, силы резания при обработке деталей, твердостью более 35 НРС, настолько вели-

ки, что даже острый инструмент формирует поверхность искаженной формы из-за чрезмерно упругих деформаций инструмента. Изменить конструкцию долбяка не представляется возможным, поэтому данную проблему необходимо решать другими средствами. Необходимо изготавливать режущую часть долбяков из твердых сплавов и быстрорежущих сталей повышенной теплостойкости со значительным содержанием ванадия и кобальта. Это вызывает значительные технологические трудности на операциях зубошлифования, особенно при шлифовании твердого сплава. Известен пример освоения технологии производства твердосплавных долбяков крупного модуля на Московском инструментальном заводе (МИЗ). Однако в авиационной промышленности используются долбяки с модулем менее 1 мм и более высокой точности.

Наиболее сложной и ответственной операцией в технологическом процессе изготовления долбяков является шлифование профиля по эвольвенте.

В зависимости от величины модуля и числа зубьев долбяков, обработка их профиля шлифованием может быть произведена различными методами, каждый из которых имеет свою об-

ласть применения и свои технологические особенности. Существуют три метода шлифования профиля по эвольвенте [2]:

- метод обката;
- метод огибания (частный случай метода обката);
- метод фасонного шлифования.

Достоинством метода фасонного шлифования является простая кинематика станка. Однако точность изготовления профиля зубьев долбяка низкая из-за неизбежных погрешностей изготовления эвольвентного профиля шлифовального круга по окружности, заменяющей эвольвенту, и установки шлифуемого долбяка относительно шлифовального круга. Вместе с тем этот метод позволяет обеспечивать высокую точность по шагу.

При методе обката centroиды инструмента и нарезаемого долбяка катятся друг по другу без скольжения, а профиль нарезаемых зубьев формируется как огибающая различных положений режущих кромок при зубошлифовании. Форма режущих зубьев при данном методе шлифования, не совпадает с профилем впадин между зубьями нарезаемого долбяка и определяется в результате достаточно сложного расчета. По этому принципу работают зубошлифовальные станки, образующие эвольвентный профиль на зуборезном долбяке при помощи червячного абразивного круга, а также при помощи тарельчатого круга. Достоинством этих методов является универсальность. При этом точность долбяков, нарезанных по методу обката, выше точности долбяков, нарезанных по методу копирования. Недостатком является сложная кинематика зубошлифовальных станков.

Шлифование профиля методом обката, в зависимости от конструкции долбяков, программы выпуска и требований к точности детали, может быть выполнено двумя способами:

- на прецизионных зубошлифовальных станках «мастер-класса», работающих при помощи эвольвентного копира, кулисного механизма и подвижных салазок (зубошлифовальные станки модели 5891 и 5893, работающие по методу огибания);
- червячным абразивным кругом на специальных зубошлифовальных станках модели 5832, 5А832 и станках импортного производства.

Практика шлифования долбяков на ФГУП ОМО им. П. И. Баранова и других машиностроительных предприятиях г. Омска показала, что каждый из этих способов имеет свои положительные и отрицательные стороны. Так, например, шлифование профиля методом огиба-

ния при помощи эвольвентного копира, кулисного механизма и подвижных салазок характеризуется как:

- наиболее точный способ получения эвольвентного профиля различного угла зацепления, который обеспечивает отклонение профиля в пределах 0,001–0,005 мм и накопленную погрешность окружного шага более 0,005 мм;
- малопроизводительный способ получения эвольвентного профиля на изделии, так как шлифуется каждая сторона зуба в отдельности, что в ряде случаев не позволяет изготавливать более одного долбяка в рабочую смену;
- требует рабочих высокой квалификации;
- имеет довольно простую систему правки абразивного круга;
- необходимо изготавливать вспомогательный технологический хвостовик для шлифования второй стороны профиля зуба хвостового долбяка.

Шлифование профиля абразивным червячным кругом характеризуется следующими показателями:

- производительность станков, работающих по данной схеме, в 10 и более раз выше, чем станков, работающих тарельчатым кругом методом огибания при помощи эвольвентного копира, кулисного механизма и подвижных салазок;
- точность получения профиля сопоставима со способом получения профиля методом обката при помощи эвольвентного копира, кулисного механизма и подвижных салазок, а отклонения по шагу составляют порядка 0,0005–0,002 мм;
- не требует рабочих высокой квалификации;
- имеет ограничения по диаметру основной окружности (не менее 15 мм) и по числу зубьев (не менее 20);
- имеет сложную систему правки червячного абразивного круга.

Метод обката является наиболее совершенным способом образования эвольвентного профиля зуба с точки зрения производительности. Цепь деления станка обеспечивает согласованное вращение червячного абразивного круга и шлифуемого хвостового мелко модульного долбяка. За один оборот однозаходного абразивного червячного круга шлифуемый долбяк должен повернуться на один зуб.

Обработка эвольвентного профиля зуба долбяка методом фасонного шлифования по дуге заменяющей окружности осуществляется на шлицешлифовальных станках, на модернизированных плоскошлифовальных станках или

на специальных зубшлифовальных станках модели 5860А.

Обработка эвольвентного профиля методом фасонного шлифования характеризуется следующими показателями:

- образование профиля методом фасонного шлифования позволяет выдерживать точность профиля зуба (дуги окружности, заменяющей эвольвенту), отличающегося от эвольвенты на 0,005–0,008 мм, с отклонением по шагу 0,001–0,002 мм;
- обладает высокой, по сравнению с методом огибания, производительностью. Так, например, в течение восьмичасовой рабочей смены один рабочий может изготовить 4–7 мелко-модульных долбяков;
- не требует рабочих высокой квалификации;
- вызывает погрешности профиля при изготовлении долбяков с модулем больше 1 мм;
- точность профиля существенно падает при изготовлении долбяков с числом зубьев менее 12;
- имеет относительно сложную систему правки абразивного круга.

Изготовление долбяков методом фасонного шлифования не позволяет изменять исходное расстояние в процессе эксплуатации (т. е. переточка долбяка производится не более одного–двух раз). Это объясняется существенным изменением профиля от номинального значения при отрицательном смещении исходного расстояния.

Одной из важнейших операций, применяемых при изготовлении эвольвентных зуборезных долбяков, является правка шлифовальных кругов. Качественная правка шлифовального круга является одним из необходимых условий изготовления качественного конечного продукта.

На практике существуют различные методы восстановления профиля и режущей способности шлифовальных кругов. Правка абразивных кругов в большей степени хорошо изучена. Преимущество их правки алмазным инструментом уже доказано и применяется повсеместно, тогда как процесс правки алмазных кругов остается областью малоизученной и применение ее при изготовлении прогрессивного режущего инструмента остается приоритетной задачей.

В настоящее время общепринятые методы правки шлифовальных кругов не обеспечивают требуемой формы и точности профиля применительно к обработке мелко-модульных долбяков. В зарубежной практике уже широко при-

меняется правка абразивных и алмазных кругов шлифованием.

Исследования показали, что способ правки шлифованием дает такие преимущества как:

- высокие режущие свойства рабочей поверхности шлифовального круга;
- значительно меньшее биение рабочей поверхности круга относительно оси шпинделя благодаря более благоприятным условиям правки шлифовального круга;
- возможность правки и профилирования алмазных и эльборовых шлифовальных кругов.

Профилирование шлифовальных кругов правкой при изготовлении мелко-модульных долбяков повышенной точности является одной из приоритетных задач.

При изготовлении долбяков применяются три метода получения эвольвентного профиля, и каждый метод получения профиля имеет индивидуальную схему правки, которая несет в себе свои индивидуальные особенности.

Так, например, метод получения профиля при помощи червячного абразива имеет сложную схему правки рабочего круга шлифованием. Этот метод позволяет править рабочий абразивный круг с высокой точностью. Правка данным методом положительно влияет на точность изделия, так как погрешности червячного абразивного круга определяют его форму. Из этих данных следует совершенно очевидно, что червячный абразивный круг содержит в себе погрешности профиля и окружного шага. Поэтому правка червячного абразивного круга является важной задачей при изготовлении эвольвентного профиля изделия высокой точности. Кроме того, существует процесс профилирования шлифовальных кругов накатыванием. Однако данный способ дает существенные погрешности профиля и низкое качество рабочей поверхности шлифовального круга.

Метод правки профиля абразивного круга для метода фасонного шлифования также несет в себе сложности и погрешности, присущие только этому методу. На рис. 1 изображена схема правки эвольвентного профиля по заменяющей окружности.

Доминирующей погрешностью, присущей этому методу, является погрешность эвольвентного профиля, которая увеличивается с ростом модуля изделия [3]. Схема образования погрешности профиля абразивного круга при данном методе заключается в том, что при замене эвольвенты окружностью на теоретическом профиле лежат всего три точки заменяющей окружности и увеличить количество точек, совпадающих с теоретическим профилем эвольвен-

ты окружностью, не представляется возможным (рис. 2). Поэтому повышение точности при правке эвольвентного профиля по методу фасонного шлифования является первоочередной задачей при изготовлении мелко модульных долбяков повышенной точности.

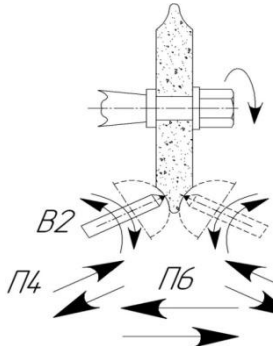


Рис. 1. Правка для метода фасонного шлифования по заменяющей окружности

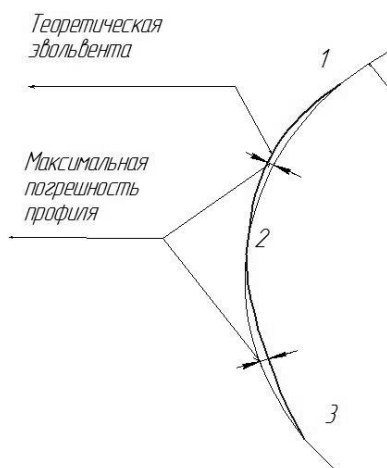


Рис. 2. Погрешность эвольвентного профиля по заменяющей окружности

Для увеличения точности эвольвентного профиля при изготовлении зуборезных долбяков по методу фасонного шлифования, был разработан способ правки и профилирования шлифовального круга шлифованием с использованием замены эвольвентного профиля эллипсом. Это позволяет вписать в теоретический профиль эвольвенты пять и более точек, лежащих на теоретическом профиле. Эллипс получается при повороте правящего шлифовального круга в двух плоскостях под определенным углом.

Шлифование эвольвентного профиля зуба хвостового долбяка с диаметром основной окружности менее 20 мм успешно выполняются методом огибания на станках 5891С, 5893, 5832 и станках импортного производства, работающих с помощью червячного абразивного круга или

тарельчатого круга. Из иностранных фирм, наиболее преуспевших в изготовлении зубошлифовальных станков, можно отметить фирму REISHAUER и фирму MAAG, признанных лидеров в области изготовления прецизионных зубошлифовальных станков.

На вышеуказанных моделях станков можно выпускать долбяки класса точности АА с неизменным эвольвентным профилем на всей величине исходного расстояния. Станки, работающие по методу обката (червячным абразивным кругом), имеют большую производительность, но имеют существенные ограничения для изготовления мелко модульных долбяков.

При смещенном центродержателе на станке 5832 можно шлифовать хвостовые мелко модульные долбяки с диаметром основной окружности 12–15 мм только при условии, что число зубьев не менее 20. Наибольшая производительность на станке 5832 достигается при шлифовании эвольвентного профиля долбяков только с малым модулем (0,2–0,5) и с диаметром основной окружности более 20–25 мм.

Станки, работающие по методу огибания по схеме с тарельчатым кругом, практически не имеют технологических ограничений (как по числу зубьев, так и по диаметру основной окружности), а имеют только конструкторские ограничения. Существенным недостатком является их низкая производительность.

Профиль зуба у мелко модульных хвостовых долбяков с небольшим диаметром основной окружности (менее 15 мм) и модулем менее 0,8 мм успешно образуется методом фасонного шлифования на специальных зубошлифовальных, шлицешлифовальных или модернизированных плоскошлифовальных станках. При изготовлении эвольвентного профиля таких долбяков разница между дугой, заменяющей эвольвенту, и номинальной эвольвентой будет минимальной (в пределах 0,002–0,003 мм).

Анализ вышесказанного показал, что для изготовления мелко модульных твердосплавных долбяков повышенной точности наиболее подходящим является метод огибания.

Как было сказано, метод огибания имеет достаточно простую схему правки, при помощи которой можно восстанавливать режущую способность алмазного шлифовального круга и придавать ему необходимую геометрическую форму.

Но метод огибания подходит только для изготовления мелко модульных твердосплавных долбяков с модулем не менее 0,8 мм, так как стойкость алмазного круга на бакелитовой связке по наружному диаметру очень низкая. Режу-

ший клин, который имеет тарельчатый алмазный круг в разрезе, быстро изнашивается, и на клине появляется площадка, превосходящая по размеру толщину впадины у ножки долбяка, таким образом, дальнейшее шлифование в тело долбяка приводит к сошлифованию соседнего профиля, что крайне нежелательно.

Дополнительным ограничением по величине модуля при изготовлении мелко модульных твердосплавных долбяков методом огибания является плохая видимость зоны резания из-за защитных кожухов и подвода охлаждения, а также необходимость визуального контроля процесса шлифования.

Таким образом, для изготовления твердосплавных долбяков с модулем менее 0,8 мм, требуется другой способ получения эвольвентного профиля, а именно – метода фасонного шлифования.

Для получения заданного профиля шлифовального круга, удаления с рабочей поверхности отходов шлифования и продуктов износа, восстановления режущей способности, круги на органической связке правят шлифованием абразивными кругами из карбида кремния зеленого твердостью МЗ – СМ1 на керамической связке, без охлаждения.

В случае, когда необходима высокая точность обработки, правку алмазного круга осуществляют непосредственно на станках, на которых производят шлифование абразивными кругами с помощью специальных приспособлений, имеющих принудительный привод, сообщаящий абразивному инструменту большую окружную скорость (30 м/сек), в то время как алмазные круги вращаются с малой скоростью (10 м/мин). При таком сочетании скоростей вращения абразивного и алмазного кругов обеспечивается относительно высокая производительность и качество правки.

Правка алмазных кругов для окончательной обработки инструментов с эвольвентным профилем с помощью приспособлений и использованием вращающихся абразивных кругов обеспечивает требуемую точность профиля таких кругов и необходимые условия для шлифования твердосплавных инструментов.

Получение эвольвентного профиля твердосплавных инструментов методом обката, когда исходным производящим контуром алмазного круга является прямая, правка производится кругами из карбида кремния зеленого без охлаждения. А получение эвольвентного профиля твердосплавных инструментов методом копирования, когда исходным производящим контуром алмазного круга является сама эвольвента,

правку алмазного круга необходимо осуществлять алмазными кругами на металлической связке с маркой алмаза АС15–АС50, с размерами зерна от 200 до 400 мкм или алмазными роликами с сохранением режимов абразивной правки. Абразивные круги быстрее изнашиваются по сравнению с алмазными кругами на металлической связке, поэтому правка должна осуществляться алмазными кругами на металлической связке.

Для получения эвольвентного профиля при шлифовании методом копирования эвольвенту обычно заменяют окружностью определенного радиуса. В нашем случае подобрать алмазные круги определенного радиуса не представляется возможным, так как промышленность выпускает стандартные круги определенных типоразмеров, а изготавливать алмазные круги на металлической связке для правки алмазных кругов на органической связке экономически нецелесообразно. Поэтому следует заменить эвольвенту кривой второго порядка – эллипсом. Это дает существенные преимущества по сравнению с заменой эвольвенты окружностью. Эвольвентный профиль имеет переменный радиус кривизны, изменяющийся в небольших пределах. При этом возникает небольшая погрешность профиля, которая увеличивается с ростом модуля.

Круг, расположенный под углом к плоскости, имеет проекцию эллипса на эту плоскость. Этот принцип будет использоваться для получения эвольвентного профиля на алмазном круге для метода фасонного шлифования.

Для замены эвольвенты кривой второго порядка, а именно эллипсом, необходимо знать  $i$  точек эвольвенты, для того чтобы вписать его в требуемый профиль.

Координаты точек эвольвенты можно определить при помощи ее параметрических уравнений [2]:

$$r_x = \frac{r_0}{\cos \alpha}; \quad (1)$$

$$\Theta_x = \operatorname{tg} \alpha_x - \alpha_x. \quad (2)$$

где  $r_x$  – радиус-вектор для искомой точки  $A_i$ ;  $r_0$  – радиус основной окружности;  $\alpha_x$  – угол давления эвольвенты;  $\Theta_x$  – эвольвентный угол точки  $A_i$ .

Найдем полярные координаты точки  $A$ , лежащей на делительной окружности (рис. 3).

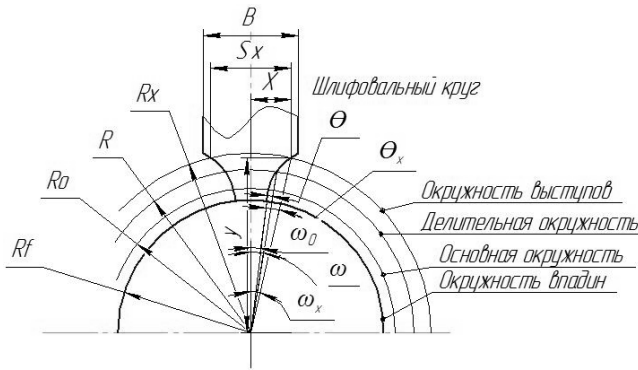


Рис. 3. Определение координат точек эвольвенты

Центральный угол  $\omega$ , соответствующий половине ширины впадины, является полярным углом для точки  $A$  и определяется:

$$\omega = \frac{360^\circ}{4z}; \quad (3)$$

Радиус-вектор  $r_x$  равен радиусу  $r$  делительной окружности.

Таким образом, полярные координаты точки  $A$  могут быть вычислены.

Радиус вектор  $r_x$  равен радиусу основной окружности  $r_0$ .

Полярный угол определяем так:

$$\omega_0 = \omega - \Theta; \quad (4)$$

$$\Theta = \operatorname{tg} \alpha_0 - \alpha_0; \quad (5)$$

где  $\omega$  – полярный угол для точки, лежащей на делительной окружности;  $\alpha_0$  – угол давления эвольвенты на основной окружности.

Полярные координаты для любой точки  $A_i$  лежащей выше или ниже делительной окружности, определяются следующим образом:

Радиус-вектор  $r_x$  задается. Зная его, мы можем определить угол давления  $\alpha_x$  для данной точки:

$$\cos \alpha_x = \frac{r_0}{r_x}; \quad (6)$$

По углу  $\alpha_x$  определяется соответствующий ему эвольвентный угол  $\theta_x$ .

$$\Theta_x = \operatorname{tg} \alpha_x - \alpha_x. \quad (7)$$

Полярный угол:

$$\omega_x = \Theta_x + \omega - \Theta. \quad (8)$$

Полярные координаты переводим в прямоугольные, располагая координаты в центре изделия, а ось  $Y$  – по оси симметрии впадины. Тогда формулы перехода будут следующие:

$$x_x = r_x \sin \omega_x; \quad (9)$$

$$y_x = r_x \cos \omega_x. \quad (10)$$

Теперь можно определить половину хорды  $S_x/2$  и высоту  $h_x$ :

$$\frac{S_x}{2} = r_x \sin \omega_x; \quad (11)$$

$$h_x = r_x (1 - \cos \omega_x). \quad (12)$$

По этим формулам находим координаты пяти равноудаленных друг от друга точек, расположенных на теоретическом профиле в системе координат шлифовального круга.

Теперь необходимо найти эллипс, проходящий через точки теоретического эвольвентного профиля.

$A_1(x_1, y_1); A_2(x_2, y_2); A_3(x_3, y_3); A_4(x_4, y_4); A_5(x_5, y_5)$ .

Задаем размер большей полуоси эллипса  $a$ . Составляем систему из пяти уравнений, характеризующих эллипс в состав которых входят точки:

$A_1(x_1, y_1); A_2(x_2, y_2); A_3(x_3, y_3); A_4(x_4, y_4); A_5(x_5, y_5)$ .

Каждое из уравнений представляет собой общее уравнение эллипса, с центром в точке  $(x_0, y_0)$  и полуосями  $a$  и  $b$  ( $a > b$ ), проходящего через заданную точку.

$$\begin{aligned} \frac{(x_1 - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y_1 - y_0)^2}{b^2} &= 1, \\ \frac{(x_2 - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y_2 - y_0)^2}{b^2} &= 1, \\ \frac{(x_3 - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y_3 - y_0)^2}{b^2} &= 1, \\ \frac{(x_4 - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y_4 - y_0)^2}{b^2} &= 1, \\ \frac{(x_5 - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y_5 - y_0)^2}{b^2} &= 1. \end{aligned} \quad (13)$$

Затем задается размер большей полуоси эллипса  $a$ . Решением данной системы уравнений будут: координаты центра эллипса  $O(x_0, y_0)$  и величина малой полуоси  $b$  (см. рис. 4), относящихся к требуемому эллипсу.

Данная система уравнений имеет некоторое множество решений, поэтому несколько вариантов положений правящего круга будут удовлетворять требованиям допуска на профиль.

В данной системе 5 уравнений и 3 неизвестных, следовательно, для нахождения решения достаточно трех уравнений системы. Из этой подсистемы определяется некоторое множество эллипсов, проходящих через 3 точки, а еще два уравнения используются для выбора искомого эллипса из этого множества.

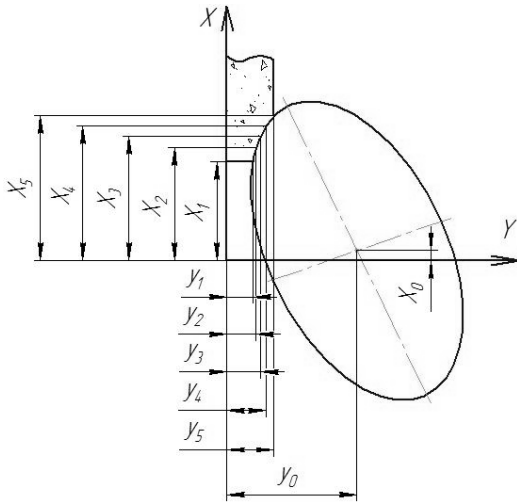


Рис. 4. Замена эвольвенты эллипсом

Введем обозначения:

$$\begin{aligned}
 X &\in \begin{vmatrix} x_0 \\ y_0 \\ b \end{vmatrix}; \\
 F(X) &\in \begin{vmatrix} f_1(X) \\ f_2(X) \\ f_3(X) \\ f_4(X) \\ f_5(X) \end{vmatrix} \in \begin{vmatrix} f_1(x_0, y_0, b) \\ f_2(x_0, y_0, b) \\ f_3(x_0, y_0, b) \\ f_4(x_0, y_0, b) \\ f_5(x_0, y_0, b) \end{vmatrix}; \\
 B &\in \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{vmatrix}, \quad (14)
 \end{aligned}$$

где  $f_1(x_0, y_0, b)$ ,  $f_2(x_0, y_0, b)$ ,  $f_3(x_0, y_0, b)$ ,  $f_4(x_0, y_0, b)$ ,  $f_5(x_0, y_0, b)$  – уравнения системы.

Тогда систему можно записать одним уравнением  $F(X) = B$  относительно векторной функции  $F$  векторного аргумента  $X$ . Для ее решения целесообразно воспользоваться математическим пакетом MathCAD professional. Данная система нелинейная, поэтому можно получить только приближенное решение, т. е. такое  $X^*$ , что величина  $\frac{\|F(X^*) - B\|}{\|B\|}$  будет минимальна.

Также важно сказать, что теоретически через пять точек, не лежащих на одной прямой, проходит единственный эллипс, но найти точное решение невозможно, а приближенное решение может быть не единственно, и оно зависит от начального приближения  $x_0, y_0, b$ , т. е. при раз-

ных приближениях могут получаться разные ответы. Невозможно посмотреть все решения этой системы и выбрать те, которые удовлетворяют цели, но возможно выбрать некоторое начальное приближение, которое гарантирует решение, на порядок превышающее результаты по точности известных методов. В данной задаче лучше всего выбирать  $(x_0, y_0)$  равной любой из точек  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ , а  $0 < b \leq 1$ , при данном приближении получается ответ, удовлетворяющий требованиям по точности.

Эту особенность можно использовать для профилирования алмазных кругов абразивными кругами из карбида кремния зеленого, учитывая постоянную поправку на износ круга.

Эвольвентное профилирование шлифовальных кругов, работающих методом копирования по заменяющему эллипсу, имеет некоторые преимущества по сравнению со способом эвольвентного профилирования по заменяющей окружности. Погрешность профиля уменьшается в 2–3 раза и с ростом модуля долбяка не увеличивается. Так, например, на долбяке с конструктивными параметрами:  $\alpha = 30^\circ$ ;  $Z = 12$ ;  $m = 2,5$  мм погрешность профиля, сделанного по способу заменяющей окружности, составила 0,005 мм, а на долбяке, изготовленном методом копирования алмазным кругом профилированным способом по заменяющему эллипсу, погрешность профиля составила 0,0015 мм. Данным способом можно изготавливать различные инструменты с эвольвентным профилем, получаемые методом копирования. Также по этому способу можно шлифовать профиль эталонных шестерен различного модуля с высокими требованиями к профилю.

К точности изготовления деталей авиационных двигателей предъявляются особые требования. Они напрямую касаются металлорежущего инструмента, участвующего в изготовлении этих деталей. Точность данного инструмента должна примерно в три раза превышать точность детали.

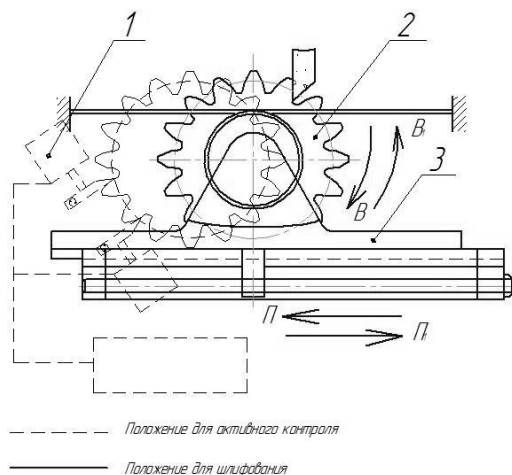
Особую роль в изготовлении такого инструмента оказывает активный контроль технологической операции, позволяющий ликвидировать большую часть погрешностей, таких как износ шлифовального круга, температурные деформации шпинделя, засаливание режущей поверхности шлифовального круга, переменность снятия припуска. Активный контроль технологической операции находит все большее применение на таких операциях как: круглошлифовальная, плоскошлифовальная, резьбошлифовальная.

Шлифование эвольвентного профиля методом обката является исключением в данном списке. Это вызвано следующими особенностями данной технологической операции:

- сложность перемещения заготовки относительно шлифовального круга;
- большие габариты датчиков, непосредственно считывающих погрешности с заготовки;
- малые габариты зоны резания.

Это требует изготовления датчиков малых габаритов. Схема активного контроля при зубошлифовании представлена на рис. 5.

В схему для активного контроля входят: два специальных датчика особой конструкции 1; долбяк 2, установленный в специальном приспособлении 3 предназначенного для зубошлифования и считывающее устройство, получающее сигналы от датчиков и преобразующее их в количественные характеристики.



**Рис. 5.** Схема активного контроля при зубошлифовании

В положении, показанном на рис. 5, сплошной линией производится процесс шлифования. При возвратно-поступательном движении долбяка П, осуществляемым совместно с вращательным движением В, в крайнем положении происходит касание датчиков двух разноименных профилей. Один из датчиков имеет контакт измерительной губки с зубом, который был прошлифован при данном переходе. Расстояние между датчиками настраивается на длину основной нормали. Любое отклонение от этой величины фиксируется датчиками. Затем происходит процесс деления и процедура повторяется. Таким образом, осуществляется процесс постоянного (активного) контроля шлифования зуба.

## ВЫВОДЫ

1. Наибольшую точность шага долбяков обеспечивает метод копирования (в пределах 0,0005–0,001 мм). При этом точность профиля обеспечить выше 0,005 мм практически не удастся из-за погрешностей, возникающих при замене эвольвенты окружностью.

2. Метод огибания изготовления эвольвентных зуборезных долбяков обеспечивает высокую точность профиля (0,001 мм) вследствие простоты получения исходного производящего контура, но не обеспечивает высокой точности окружного шага из-за непостоянства технологической базы при шлифовании разноименных профилей.

3. Метод обката при помощи червячного абразива обеспечивает высокую точность окружного шага из-за постоянства технологической базы, но не обеспечивает точности профиля из-за погрешности червячного абразива, вызванной несовершенством метода профилирования и правки.

4. Правка и профилирование алмазных кругов на бакелитовой связке производится абразивными кругами. Правка и профилирование алмазных кругов для шлифования профиля зубьев твердосплавных долбяков может осуществляться только абразивными кругами, что требует оснащения станков, работающих по методу копирования, специальными механизмами правки.

5. Причиной низкой точности профиля при методе копирования является замена эвольвенты на радиус окружности, который можно вписать в эвольвентный профиль не более чем по трем точкам теоретического профиля. Повысить точность профиля можно за счет замены эвольвенты элементом эллипса, который можно вписать в эвольвентный профиль по пяти и более точкам теоретического профиля.

6. Разработанный метод может быть реализован с помощью абразивного круга, установленного таким образом, чтобы его образующая поверхность представляла собой в проекции эллипс необходимых параметров.

7. Разработана методика замены профиля эвольвенты элементом эллипса и технологическое обеспечение для реализации метода.

Разработанный метод правки кругом, развернутым под определенным углом, позволяет получать высокую режущую способность рабочей поверхности шлифовального круга и точность профиля шлифовального круга в пределах 0,0005–0,001 мм из-за замены эвольвенты элементом эллипса, проходящем по пяти и более точкам заменяемой эвольвенты.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Малкин А. Я.** Обработка резанием высокопрочных и жаропрочных материалов. М.: НТОмашпром, 1961.

2. **Гречишников В. А., Орлов В. Ф., Щербаков В. Н.** Основные положения и рекомендации по проектированию и изготовлению металлорежущего инструмента в условиях единичного, мелкосерийного производства. М.: НИИАТ, 1984. 43 с.

3. **Шлифование** профиля мелко модульных твердосплавных зуборезных долбяков / А. Ю. Попов [и др.] // Омск: ОмГТУ, 2006. 122 с. Деп. в ВИНТИ 23.11.06., № 1456-B2006.

## ОБ АВТОРАХ

**ВАСИЛЬЕВ Евгений Владимирович**, доц. каф. металлореж. станков и инструментов. Дипл. инженер (ОмГТУ, 2001). Канд. техн. наук по технол. машиностроения (ОмГТУ, 2006). Иссл. в обл. алмазного шлифования твердосплавных изделий

**НУРТДИНОВ Юрий Рашитович**, ст. преп. каф. металлореж. станков и инструментов. Дипл. инженер (ОмГТУ, 2003). Канд. техн. наук по технол. машиностроения (ОмГТУ, 2007). Иссл. в обл. алмазного шлифования твердосплавных долбяков.

**ПОПОВ Андрей Юрьевич**, зав. каф. металлореж. станков и инструментов. Дипл. инженер (СТАНКИН, 1979). Д-р техн. наук по технол. и оборуд. техн. и физ.-техн. обработки (СТАНКИН, 1998), проф. Иссл. в обл. реновации твердосплавных инструментов.

## METADATA

**Title:** Analysis of the schemes forming the involute profile of the surface of gear cutting cutters

**Authors:** E. V. Vasiliev, Y. R. Nurtdinov, and A. U. Popov.

**Affiliation:** Omsk State Technical University (OmGTU), Russia.

**Email:** wasilyev\_@mail.ru, popov\_a\_u@list.py.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 17, no. 8 (61), pp. 29-37, 2013. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** Different schemes of forming an involute gear cutting surface cutters are analyzed in terms of performance grinding, profile accuracy and surface quality. We consider a common method to replace the involute radius of a circle that can be inscribed in the involute profile of not more than three points of the theoretical profile, which is one of the main reasons for the low profile accuracy in the method of copying. To increase the accuracy of involute profile, the production of gear cutting cutters shaped grinding method, a method is proposed to introduce changes and profiling of the grinding wheel grinding using replacement involute profile of an ellipse. Replacing evolvent ellipse can enter into a theoretical involute profile five or more points lie on the theoretical profile.

**Key words:** grinding; ram; centroid; involute.

**References (English transliteration):**

1. A. J. Malkin, *Machining of high-strength and high-temperature materials*, (in Russian). Moscow: NTOmashprom, 1961.
2. V. A. Grechishnikov, V. F. Orlov, and V. Shcherbakov, *Executive summary and recommendations for the design and manufacture of cutting tools in a single, small-scale production*. Moscow: NIIAT. 1984.
3. A. Y. Popov et al., *Profile Grinding fine-grained carbide gear cutting cutters*, (in Russian). Omsk: OmGTU, 2006. Dep. in VINITI 23.11.06., № 1456 - V2006.

**About authors:**

**VASILIEV, Evgeny Vladimirovich**, Assoc. Department. "Metal-cutting machine tools and instruments". PhD. in Mechanical Engineering. Research in the field of diamond grinding carbide products.

**NURTDINOV, Yuri Rashitovich**, Art. Ven. of "Metal-cutting machine tools and instruments" Dept. PhD. in Mechanical Engineering. Research in the field of diamond grinding of carbide cutters.

**POPOV, Andrey Yurievich**, Head of "Metal-cutting machine tools and instruments" Dept. Doctor of Science in Technology and equipment of technical and physical. Research in the field of renovation carbide tools.