

**Ключевые слова:**

крупномодульные зубчатые колеса, изготовление зубчатых колес, зубочтение, специальный зуборезный инструмент

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

**Виктор БАЛКОВ, Леонид КАМЕНЕЦКИЙ, Евгений НЕГИНСКИЙ,
Олеся ОТТ, Дмитрий ПИЩУЛИН**

Представлены особенности расчета и проектирования зуборезного инструмента для обработки цилиндрических зубчатых колес в условиях мелкосерийного и единичного производства. Приведен анализ основных положений методик профилирования зуборезного инструмента различного назначения. Предложены альтернативные традиционным методам зубообработки перспективные технологические подходы и конструкции инструмента для их реализации.

В настоящее время для отечественного машиностроения все большее значение приобретает решение задач импортозамещения. В частности, эти задачи весьма актуальны для трудоемкого и дорогостоящего производства крупномодульных зубчатых передач, востребованного во многих отраслях промышленности страны. В данной статье предложен ряд теоретических и экспериментальных разработок ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» в данной области.

Традиционная технология обработки резанием цилиндрических зубчатых колес основана на применении метода обкатки и метода единичного деления. В условиях крупносерийного и массового производства в подавляющем большинстве случаев используется метод обкатки с применением цельных червячных фрез (как правило многозаходных) с оптимальными для обрабатываемого зубчатого изделия конструктивными и геометрическими параметрами. На современном станочном оборудовании такой инструмент, изготовленный из порошковых быстрорежущих сталей с нанесением специализиро-

ванных покрытий, может эксплуатироваться на скоростях резания 120 м/мин и более, а значит удовлетворяет наиболее важному для данных условий производства критерию – максимальной производительности. В мелкосерийном, а в особенности единичном производстве, характерном при изготовлении крупномодульных зубчатых колес, достижение критерия максимальной производительности не имеет решающего значения. Для этих условий, наряду с зубофрезерованием червячными фрезами, достаточно широко применяется метод единичного деления с использованием зуборезного инструмента дискового или пальцевого типа.

При решении задач проектирования и расчета профиля зуборезного инструмента предполагается, что его режущие кромки располагаются на некоторой исходной инструментальной поверхности (ИИП), при этом, вне зависимости от метода обработки и применяемого инструмента, ИИП и обрабатываемая боковая поверхность (ОБП) изделия в точке контакта (профилирования) должна иметь общую касательную плоскость и общую нормаль.

Наиболее распространенный способ формализации условия контакта ИИП и ОБП основан на так называемом «кинематическом методе» и заключается в равенстве нулю скалярного произведения векторов относительной скорости $\bar{V}_{отн}$ и нормали \bar{N} к ОБП в контактной точке:

$$\bar{N} \cdot \bar{V}_{отн} = 0. \quad (1)$$

Смысл уравнения (1) состоит в требовании равенства нулю нормальной составляющей скорости относительного перемещения ОБП и ИИП в точке контакта. Благодаря своей компактности и наглядности кинематический метод нашел широкое применение. Можно формализовать условия для расчета различных зуборезных инструментов, рассматривая уравнение (1) совместно с зависимостями, определяющими тип ИИП. Принимая в качестве общего случая ИИП в форме винтовой поверхности, удобно воспользоваться известным соотношением:

$$y_0 N_{x0} - x_0 N_{y0} = p_0 N_{z0}, \quad (2)$$

где x_0, y_0 и N_{x0}, N_{y0}, N_{z0} – декартовы координаты соответственно текущей точки радиуса-вектора ОБП и проекции вектора нормали к ней в системе координат, связанной с инструментом; p_0 – винтовой параметр ИИП.

При зубофрезеровании червячными фрезами координаты профиля инструмента определяются на основе системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \bar{N} \cdot \bar{V}_{отн} &= 0 \\ y_0 N_{x0} - x_0 N_{y0} &= p_0 N_{z0} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Уравнения системы (3) зависят от двух криволинейных координат (условно назовем их u и v) и параметра движения ϕ . При $\phi = \text{const}$ имеет место система двух уравнений с двумя неизвестными, решением которой является пара значений u и v , определяющих положение одной контактной точки в пространстве в каждый момент времени. Таким образом, при червячном зубофрезеровании имеет место точечный контакт ОБП и ИИП.

При решении задачи профилирования инструментов в форме поверхностей вращения (дисковых и пальцевых фрез) для обработки винтовых поверхностей методом единичного деления, вследствие чего $\bar{N} \cdot \bar{V}_{отн} \equiv 0$. В данном случае единственным условием существования в контактной точке общей нормали ОБП и ИИП становится пересечение этой нормали с осью инструмента. Такое условие формализуется как частный случай соотношения (2) при $p_0 = 0$, а именно $y_0 N_{x0} - x_0 N_{y0} = 0$, при этом ОБП и ИИП имеют линейный контакт.

Помимо упомянутых традиционных методов изготовления цилиндрических зубчатых колес, необходимо отметить метод зуботочения, впервые научно обоснованный в ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ». Сущность этого метода заключается в том, что для его реализации используется специальный инструмент (обкаточный резец) типа косозубого долбяка с числом зубьев, равным числу заходов, работающий при согласованных вращениях инструмента и изделия на их скрещивающихся в пространстве осях. Особенностью методики расчета данного инструмента является отсутствие ограничений на тип ИИП, то есть для его расчета, в отличие от червячных фрез, используется только условие $\bar{N} \cdot \bar{V}_{отн} = 0$.

При $\phi = \text{const}$ это условие характеризует зависимость между криволинейными координатами u и v , которую геометрически можно представить, как линию в пространстве. Таким образом, при зуботочении в каждый момент времени будет иметь место линейный контакт ОБП и ИИП, при этом форма линий контакта при изменении угла поворота ϕ также будет различаться. Учитывая вышеизложенное, ИИП в данном случае можно представить как геометрическое место линий контакта, определенных в системе координат, жестко связанной с инструментом. Профиль обкаточного резца образуется сечением ИИП плоскостью передней поверхности. Поскольку любая точка профиля такого инструмента при определенном значении параметра ϕ будет являться точкой контакта, огранка профиля изделия при зуботочении отсутствует.

Необходимо отметить, что метод зуботочения не обладает свойством универсальности, то есть обкаточный резец является специальным инструментом, пригодным только для обработки определенного изделия и требует точного позиционирования относительно заготовки вдоль своей оси (является инструментом определенной установки). Кроме того, возможности эффективного применения метода зуботочения в значительной степени ограничены отсутствием станочного оборудования, рассчитанного на быстрое вращение стола. Поэтому, а также в силу ряда других причин, данный метод не получил широкого распространения в промышленности. Исключение составляет его успешное внедрение на ряде отечественных предприятий при серийном производстве колес с внутренними зубьями при существенном (до 5 раз) повышении производительности обработки по сравнению с традиционным зубодолблением.

В настоящее время все более отчетливо проявляется необходимость разработки новых эффективных технологий зубообработки применительно к мелкосерийному и единичному производству.

В условиях отсутствия в стране централизованного производства крупномодульных червячных фрез, а также необходимости решения технологической проблемы нарезания закаленных зубчатых колес, создание альтернативных технологий на основе применения метода зуботочения представляется одним из весьма перспективных направлений.

В целях развития указанного направления в ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» был выполнен комплекс НИОКР, включающий создание прикладного программного обеспечения по расчету специального сборного зуборезного инструмента, разработку конструкции и технологии его изготовления, ориентированной на использование оборудования с ЧПУ. На рис. 1 представлена 3D-модель инструмента, предназначенного для чистового нарезания закаленной до HRC 50 шевронной вал-шестерни модулем $m = 20$ мм, числом зубьев $z_1 = 30$ и углом наклона зубьев $\beta_1 = 30^\circ$. Инструмент выполнен в виде однозубой фрезы-летучки определенной установки относительно оси изделия с механическим креплением фасонных режущих элементов в корпусе насадного типа. Согласование вращений инструмента и изделия аналогично зубофрезерованию однозаходными червячными фрезами. Положение плоскости передней поверхности рассчитывается исходя из параметров обрабатываемого изделия и параметров установки инструмента на станке с учетом создания благоприятных для обеспечения процесса резания углов наклона режущих кромок.

Необходимо отметить, что разработка 3D-модели в данном случае представляется необходимым этапом технологической подготовки производства, поскольку существенно упрощает формирование пакета исходных данных для управляющих программ при корпусной обработке и последующий контроль точностных параметров инструмента. Общий вид образцов инструмента в правом и левом исполнении (для правого и левого направлений венцов шевронной вал-шестерни соответственно) представлен на рис. 2. Режущие элементы с фасон-

Рис. 1.
3D-модель
сборного
специального
инструмента



Рис. 2. Специальный инструмент для чистового нарезания правого и левого венцов шевронной вал-шестерни

ным профилем изготавливались из заготовок высокопрочного твердого сплава на электроэрозионном оборудовании с ЧПУ, а обработка корпусов – на 5-координатном обрабатывающем центре.

Отдельного внимания заслуживает безусловно перспективное направление, связанное с использованием зуборезного инструмента с режущей частью из твердого сплава применительно к его эксплуатации на станках с ЧПУ. Преимущество этого направления заключается в возможности изготовления сложных зубчатых деталей при существенном упрощении конструкции дорогостоящего зуборезного инструмента. Правильное формообразование боковых поверхностей обеспечивается кинематикой станка с ЧПУ и основывается на общеизвестных положениях теории зацеплений, согласно которым, любую эвольвентную винтовую поверхность (в частности боковые поверхности прямозубых колес) можно получить соответствующим движением плоскости. В силу этого, наибольшее упрощение конструкции, а следовательно, и существенное снижение себестоимости изготовления инструмента достигаются при расположении режущих кромок на ИИП плоской формы (торцевой поверхности инструмента). В настоящее время разработана гамма из двенадцати моделей сборных дисковых фрез, оснащенных твердосплавными неперетачиваемыми пластинами, для прецизионной обработки зубчатых колес в диапазоне модулей от 12 до 50 мм. Фрезы (рис. 3) изготовлены на производственной базе ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» и оснащены восемью прямоугольными твердосплавными пластинами, каждая из которых имеет две прямолинейные режущие кромки. Крепление пластин в корпусе фрезы осуществляется через отверстия винтами с конической головкой с базированием по боковой стороне пластины и опорной поверхности. Кон-



Рис. 3. Сборная фреза с твердосплавными неперетачиваемыми пластинами

струкция позволяет осуществлять плавную регулировку пластин посредством регулировочных винтов, установленных в резьбовых вставках корпуса фрезы.

Использование сборного инструмента, оснащенного сменными твердосплавными пластинами, позволяет повысить эффективность обработки за счет обеспечения возможности использования прогрессивных инструментальных материалов, в частности твердых сплавов с изгибной прочностью не менее 3500 МПа и твердостью не менее 91,5 HRA.

Испытания инструмента проводились на специализированном исследовательском комплексе на базе прецизионного 5-координатного обрабатывающего центра совместной разработки ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» (Россия) и Willemin Macodel (Швейцария) при чистовом нарезании прямоугольных зубчатых колес $m = 12$ мм и $z = 18$ из стали 40X.

В результате выполнения комплекса НИОКР была теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность достижения степени точности 6 по ГОСТ 1643-81 зубчатых колес, обрабатываемых инструментом дискового типа на станках с ЧПУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье выполнен анализ основных теоретических положений для проектирования зуборезного инструмента различных типов. Предложены альтернативные традиционным методам технологические подходы к изготовлению зубчатых колес на станках с ЧПУ и конструкции относительно простого и недорогого зуборезного инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В.Н., Боровский Г.В., Боровский В.Г., Григорьев С.Н. Инструмент для

высокопроизводительного и экологически чистого резания. — М., 2010. (Сер. Библиотека инструментальщика).

2. Балков В.П., Каменецкий Л.И., Кирютин А.С., Негинский Е.А., Отт О.С., Пищулин Д.Н. Современные технологические подходы при изготовлении цилиндрических зубчатых колес в условиях мелкосерийного производства и особенности расчета и проектирования зуборезного инструмента // *Металлообработка*. 2015. № 4 (88). С. 2–6.
3. Боровский Г.В., Григорьев С.Н., Маслов А.Р. Справочник инструментальщика / Под общ. ред. А.Р. Маслова; 2-е изд., испр. — М., 2007.
4. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. — М.: Наука, 1968. 584 с.
5. Отт О.С. Сборные дисковые зуборезные фрезы и процесс механической обработки крупномодульных зубчатых колес на станках с ЧПУ // *Известия МГТУ МАМИ*. 2011. № 1. С. 174–177.
6. Отт О.С., Артюхин Л.Л. Аналитическая модель формообразования эвольвентных профилей дисковым инструментом // *СТИН*. 2010. № 12. С. 19–24.
7. Пищулин Д.Н., Отт О.С. Инновационные технологические процессы обработки резанием зубчатых деталей на станках с ЧПУ // Тезисы доклада на Международном Форуме «Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и механизмов», Москва, 26–27 мая 2009 г. С. 73–75.

БАЛКОВ Виктор Павлович –

кандидат технических наук, заместитель генерального директора ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» по научной работе

КАМЕНЕЦКИЙ Леонид Исарьевич –

заведующий отделом резобообразующего инструмента ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ»

НЕГИНСКИЙ Евгений Анисимович –

заместитель генерального директора ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» по инновационным технологическим проектам

ОТТ Олеся Сергеевна –

кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ»

ПИЩУЛИН Дмитрий Николаевич –

заведующий отделом зуборезного инструмента ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ»