

Численные методы моделирования

УДК 621.9-1/-9

DOI: 10.14529/engin220406

РАСЧЕТ ДИСКОВОЙ МОДУЛЬНОЙ ФРЕЗЫ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ КОСОЗУБОГО КОЛЕСА КЛАССИЧЕСКИМ (В SOLIDWORKS) И ДИСКРЕТНЫМ ТВЕРДОТЕЛЬНЫМ ТИПАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

И.А. Щуров

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Проектирование дисковых модульных фрез для нарезания косозубых колес включает в себя определение профиля инструмента. Задача профилирования инструментов, работающих по методу обката, решалась в течение десятилетий с использованием аналитических, графоаналитических и графических подходов. Современная практика проектирования инструментов все более основывается на применении CAD/CAM/CAE-систем. Такие программы, как Solidworks позволяют формировать сложные объемные тела путем протягивания элементарного объемного тела вдоль некоторой направляющей линии. Это соответствует формированию вогнутой поверхности детали выпуклой поверхностью инструмента. Таким образом, в настоящее время появилась основа для решения задачи формообразования фасонных дисковых инструментов с использованием указанных CAD- или САМ-систем. Между тем примеров решения таких задач с использованием CAD-систем в литературе найти не удалось. В работе предложено решение данной задачи для случая профилирования дисковой модульной фрезы при обработке косозубого колеса. Решение прямой задачи выполнено с использованием одной из наиболее распространенных программ – Solidworks. Обратную задачу удалось решить только с использованием метода дискретного твердотельного моделирования. Наложение исходного САД-профиля впадины зубчатого колеса на полученную моделированием обработки рассчитанной фрезой подобную впадину колеса показало их качественное совпадение. Следовательно, данное моделирование позволяет применять указанные методы расчета в производственной практике проектных работ по зубообработке.

Ключевые слова: дисковая модульная фреза, косозубое колесо, профилирование, формообразование, CAD, Solidworks.

Введение. Для изготовления небольших партий косозубых колес и шлицевых валов с эвольвентным профилем применяются дисковые фрезы. В отличие от прямозубых колес, когда профили инструмента и впадины зубчатого колеса практически совпадают, в случае фрезерования косозубых колес такие профили никогда не совпадают ни в каком из возможных сечений. Последнее обстоятельство связано с явлением обката, вследствие чего расчет профиля инструмента требует применения сложных методик и математических зависимостей. Решению этой задачи посвящены сотни публикаций во всем мире, включая книги [1, 2]. Нередко сложность расчетов и трудности с их автоматизацией, обусловленные наличием трансцендентных уравнений, тригонометрических зависимостей с множеством реальных и мнимых корней, вызывают неприятие их у проектировщиков инструментов. Несмотря на это, подобные методы расчета продолжают развиваться и находят свое отражение в публикациях [3–12].

Другим способом расчета профиля подобных инструментов является применение графических подходов. Появившиеся компьютерные программы геометрического моделирования позволяют облегчить применение этих подходов [13]. Очевидно, что наиболее простым и привычным в настоящее время подходом для проектировщиков является применение классического твердотельного моделирования [14–20]. С использованием его решаются простые задачи [14, 15]. Появилась возможность формировать сложные трехмерные объекты путем протягивания простых тел вдоль заданной кривой линии и решать, например, задачи зубодолбления прямозубых колес [14]. Такая возможность в частности появилась в такой распространенной программе, как

Solidworks с начала прошедшего десятилетия. Соответственно профиль дисковой фрезы можно было бы определить поворотом образуемой ею впадины вокруг оси фрезы. Далее применением операции твердотельного моделирования, а именно: разности тела в форме кругового цилиндра («заготовки» фрезы) и указанного трехмерного объекта, позволило бы получить тело фрезы, ограниченное его исходной инструментальной поверхностью. Последующее формирование в таком теле стружечных канавок и затылованных задних поверхностей позволило бы получить модель фрез, близкую к требуемой форме.

Однако попытки реализовать такой подход все еще сопряжены определенными трудностями и недостатками современных графических ядер указанных CAD-программ. В частности, операция «Вырез по траектории», аналогичная вырезанию впадины зубчатого колеса дисковой фрезой, не может быть реализована для тел, не удовлетворяющих определенным условиям. В числе таких условий выпуклость профиля фрезы и его тривиальная форма – прямые линии или дуги окружностей. Дисковые модульные фрезы при решении обратной задачи или впадины зубчатого колеса при решении прямой задачи не удовлетворяют таким условиям: они имеют как выпуклые, так и вогнутые участки и имеют криволинейный, в том числе эвольвентный профили. Таким образом, задача профилирования указанных инструментов с применением CAD-программ типа Solidworks все еще требует своего решения. Как пример, можно отметить работы, в которых используется как классическое твердотельное моделирование, так и альтернативные методы, например с использованием множеств профилирующих линий [16]. Зачастую решения связаны с определением сил резания [17, 18] или влиянием на геометрию задних углов [19, 20].

Исходя из этого, целью настоящего исследования была разработка методики расчета с применением CAD-программ профиля дисковой модульной фрезы для обработки косозубого колеса.

1. Расчетная схема и классическое твердотельное моделирование в Solidworks для решения прямой задачи. Попытка решения традиционным способом с использованием операции «Выреза по траектории». Практически все современные CAD-системы позволяют формировать сложные тела или вырезать сложные поверхности путем протягивания объемного твердого тела по заданной траектории. Такие сложные тела представляют собой тела, заключенные в поверхности, огибающей семейство поверхностей, каждая из которых представляет собой поверхность, ограничивающую протягиваемое тело. В случае расчета профиля дисковой модульной фрезы достаточно повернуть вокруг ее оси тело косозубого колеса, ограниченное в некоторой области вокруг впадины одного из его зубьев. Очевидно, что при этом должны быть установлены все требования по расположению друг относительно друга фрезы и зубчатого колеса: межосевое расстояние, угол скрещивания их осей и, например, смещение базового торца фрезы относительно межосевой линии.

Реализация данной задачи была предпринята на примере профилирования дисковой фрезы для обработки специального косозубого колеса со следующими параметрами: диаметр окружности вершин колеса $d_a = 200$ мм, модуль $m = 8$ мм, число зубьев $z = 20$, угол наклона линии зуба $\beta = 32^\circ$. Профиль зуба колеса построен по точкам через касательные отрезки заданной длины к начальной окружности колеса. Внешний вид колеса и профилей его впадины представлен на рис. 1.

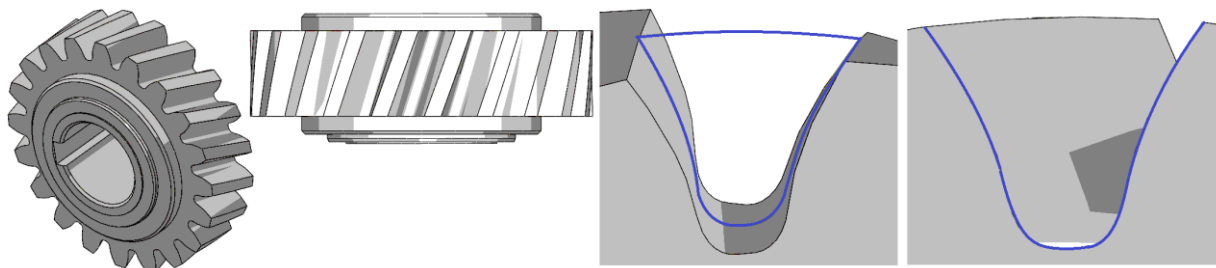


Рис. 1. Косозубое колесо и профили впадины в его нормальном и радиальном сечениях

Далее была предпринята попытка выделить фрагмент зубчатого колеса в области впадины одного из его зубьев и повернуть его вокруг оси фрезы с вырезом из диска цилиндрической заготовки этой фрезы предварительным диаметром $D = 112$ мм (рис. 2). Была применена операция

Численные методы моделирования

«Вырез по траектории» для «Твердого тела по траектории». После выбора траектории и твердого тела в программе появилось сообщение: «Тело инструмента должно быть повернутым элементом, состоящим из аналитической геометрии, например, линий и дуг». Упрощение профиля путем его аппроксимации дугами окружностей и даже отрезками прямых линий не позволило получить требуемого результата.

Таким образом, современное графическое ядро программы Solidworks 2018 не позволило пока вырезать телом зубчатого колеса в теле заготовки фрезы нужный профиль и решить поставленную задачу естественным способом. После этого была предпринята другая попытка решить данную задачу через круговой массив твердого тела.

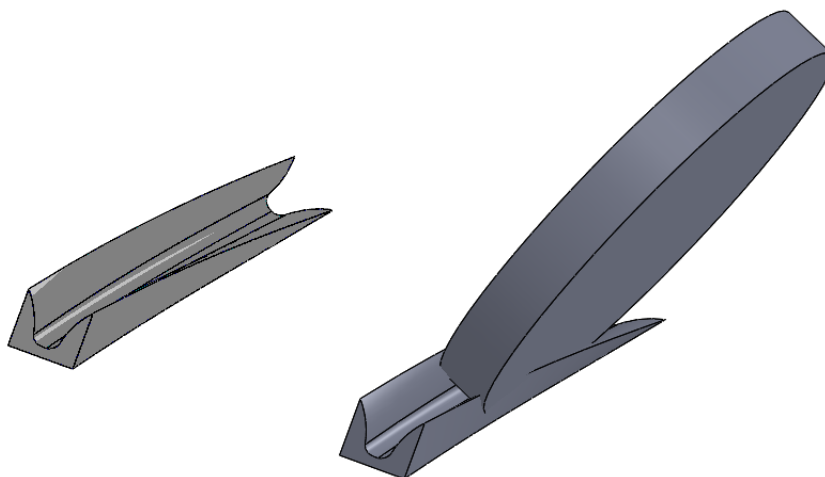


Рис. 2. Фрагмент зубчатого колеса в области впадины его зуба и размещение на нем фрагмента с заготовкой фрезы

Решение задачи профилирования с использованием операции «Круговой массив». Используя операцию «Круговой массив», было произведено построение 20 фрагментов колеса в пределах угла поворота вокруг оси фрезы, равного 40° (рис. 3, а). Далее аналогично предыдущему был построен круговой цилиндр – диск заготовки модульной фрезы (рис. 3, б). Поскольку дисковая фреза должна иметь все необходимые конструктивные элементы и параметры, то на этом этапе было выполнено моделирование стружечной канавки с использованием операции «Вытянутый вырез» (рис. 3, в). Уже после этого была применена булева операция разности областей моделирования, а именно: из указанной заготовки фрезы была удалена область, принадлежащая множеству фрагментов зубчатого колеса, полученная выше. В результате была получена модель дисковой фрезы со стружечной канавкой и с кромкой, вращение которой даст исходную инструментальную поверхность фрезы (рис. 3, г).

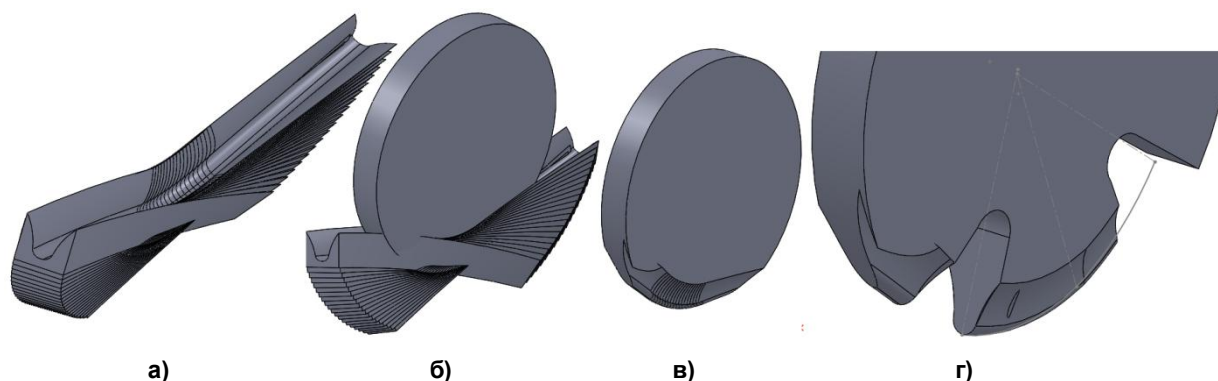


Рис. 3. Множество фрагментов в области впадины зуба колеса (а), дисковая «заготовка» фрезы (б), разность этого тела с множеством фрагментов колеса (в), тело «заготовки» фрезы со стружечными канавками (г)

Как видно из рис. 3, г, режущая кромка пересекает область из множества линий, образованных множеством фрагментов тел, ограничивающих области вокруг впадин зубчатого колеса. Следовательно, принятого выше угла 40° достаточно для безошибочного выполнения моделирования.

На следующем этапе моделирования дисковой фрезы необходимо выполнить ее радиальное затылование для получения требуемого заднего угла в радиальной плоскости. Как известно, затылование дисковых фасонных фрез обычно производится по архимедовой спирали от соответствующих кулачков на токарно-затыловочных станках. Инструмент второго порядка фасонный резец или абразивный круг в этом случае необходимо профилировать по форме полученного контура режущей кромки фрезы. Такой требуемый профиль можно получить путем построения в Solidworks рабочего чертежа – «Создание чертежа из детали». На рис. 4, а показан вид, но уже в самой системе 3D-моделирования Solidworks. Для построения кривой затылования необходимо в осевом сечении инструмента построить архимедову спираль.

Среди коммерческих CAD-продуктов не удалось обнаружить программ с встроенными в них типовыми кривыми, используемыми в инструментальном производстве: архимедовой спиралью, циклоидальной кривой, эвольвентой окружности и т. д. В связи с этим, как и в случае эвольвенты для зубчатого колеса, представляется возможным лишь построение требуемой архимедовой спирали по расчетным точкам с последующим обводом, например, сплайновой кривой. Пример построения таких точек приведен на рис. 4, б. В радиальной плоскости фрезы от ее оси можно провести, например, пять отрезков с последовательно уменьшающейся длиной, как это реализуется в случае архимедовой спирали. Далее полученные точки можно обвести сплайном. Однако последующие построения задней поверхности с его использованием вызвали отказ в расчетах. В связи с этим оказалось целесообразным построить затыловочную кривую дугами окружностей по трем точкам.

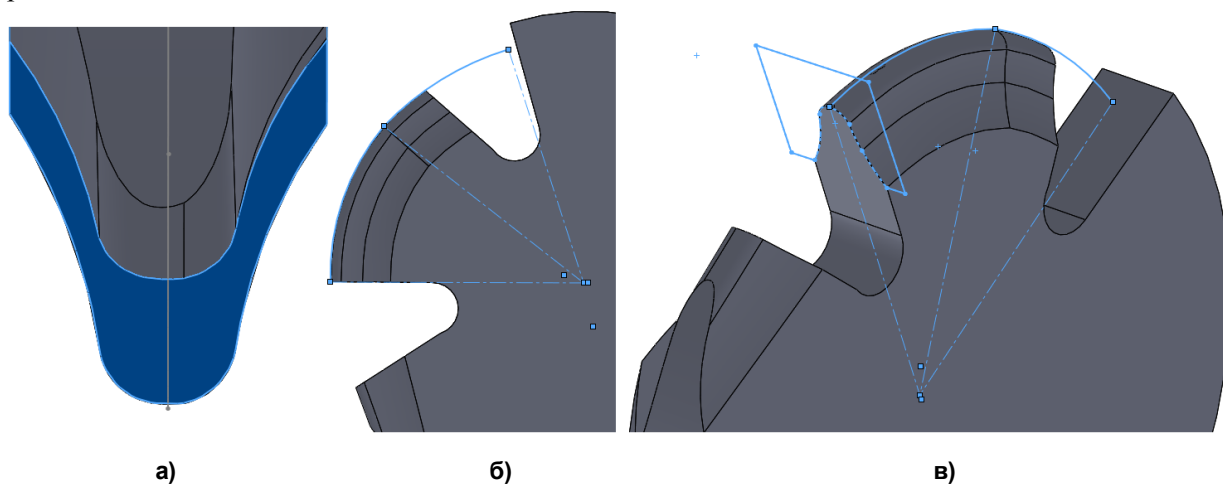


Рис. 4. Профиль режущей кромки – габаритная линия снизу (а),
схема к построению кривой затылования (б)
и CAD-модель зуба фрезы с затылованием (в)

Аналогично предыдущему случаю, связанному с архимедовой спиралью, для успешной реализации расчетов пришлось аппроксимировать линию режущей кромки по ее точкам также дугами окружностей. Для выполнения операции «Вырез по траектории» линии режущей кромки были замкнуты в непрерывный контур вспомогательными прямыми линиями (рис. 4, в). Это аналог передней поверхности затыловочного резца. Вырез этого контура по аппроксимированному аналогу архимедовой спирали является аналогом затылования фасонным резцом на токарно-затыловочном станке. Результат этой операции показан на рис. 4, в. Таким образом, решение прямой задачи средствами CAD-системы моделирования оказалось достижимым.

2. Расчетная схема и дискретное твердотельное моделирование для решения обратной (проверочной) задачи. Попытка решения традиционным способом с использованием классического твердотельного моделирования в CAD-программе не позволила получить успешное решение. В процессе построений, а именно: при перемещении зуба фрезы по винтовой линии вокруг

Численные методы моделирования

оси цилиндрической заготовки зубчатого колеса, программа давала сообщения, что данное построение невозможно. Соответственно, не получалось сделать и вырез семейством тел фрезы или последовательно ее телом в отдельных его положениях. В связи с этим оказалось целесообразным воспользоваться ранее разработанной методикой дискретного твердотельного моделирования [21]. В отличие от классического твердотельного моделирования, в котором все элементы технологической системы представляются наборами тел, ограниченных каноническими и сплайновыми поверхностями, в дискретном твердотельном моделировании все элементы данной системы представляются в виде множеств частиц (вокселей), заполняющих такие тела. Данный подход является аналогом численного моделирования в физических расчетах, в которых все тела представляются или конечными элементами, или, например, SPH-частицами. Такая дискретизация областей, занимаемых элементами технологической системы, на подобласти (конечные элементы или частицы) позволила решить задачи физического моделирования, которые классическими аналитическими методами, например теорией упругости, решить не удавалось. В данном случае дискретизация областей на подобласти – частицы или воксели – имеет такую же цель: заменить проблемные аналитические решения систем уравнений поверхностей, ограничивающих области, на решения в виде уравнений алгебры множеств, которые всегда дают устойчивые решения для тел любой сложности с любым формообразующим движением.

В соответствии с таким подходом обратная задача решалась путем реализации следующих этапов. *На первом этапе* было выполнено моделирование тела исходной инструментальной поверхности (ИИП) полученной выше дисковой модульной фрезы.

$$\begin{aligned} R_{i+1} &= R_i + \Delta R \text{ для } R_{\text{вн}} < R_i \leq R_{\text{нар}}(z_i); \\ \varphi_{i+1} &= \varphi_i + \Delta\varphi \text{ для } 0 < \varphi_i \leq 360^\circ; \\ z_{i+1} &= z_i + \Delta z \text{ для } -L/2 < z_i \leq L/2, \end{aligned} \quad (1)$$

где R_i , φ_i , z_i – координаты i -го вокселя в цилиндрической системе координат фрезы;

ΔR , $\Delta\varphi$, Δz – приращения шага воксельной сетки по трем координатам;

$R_{\text{вн}}$, $R_{\text{нар}}(z_i)$, L – внутренний (посадочного отверстия), наружный (по профилю, зависящему от z) диаметры фрезы и ее толщина.

Полученное при решении прямой задачи множество точек профиля ИИП дисковой фрезы может быть с достаточной для практики точностью аппроксимировано сплайновой линией. Однако при большом числе точек и достаточно малом расстоянии между ними этот профиль может быть также достаточно точно аппроксимирован дугами окружностей, проведенными по трем точкам, указанного множества. В частности, такие программы, как Solidworks позволяют построить требуемые дуги окружностей и сразу же получить все их параметры: их радиус r , координаты центра (A, B) , координаты начальной и конечной точек (x, z) . В этом случае искомый радиус-вектор точек профиля фрезы можно определить как

$$R_{\text{нар}}(z_i) = \pm \sqrt{r_j^2 - (z_i - A_j)^2} + B_j \text{ для } z_{sj} = z_i + \Delta z \text{ для } z_{sj} < z_i \leq z_{ej}, \quad (2)$$

где r_j , A_j , B_j – радиус текущей j -й дуги окружности профиля ИИП дисковой фрезы и координаты ее центра в системе координат фрезы;

z_{sj} , z_{ej} – аппликаты стартовой и конечной точек дуг окружностей, аппроксимирующих профиль ИИП фрезы.

На втором этапе по общеизвестным формулам перехода от цилиндрической системы координат в декартову такие координаты (x_i, y_i, z_i) точек вокселей фрезы пересчитываются для системы координат заготовки зубчатого колеса (x_{fi}, y_{fi}, z_{fi}) :

$$\begin{pmatrix} x_{fi} \\ y_{fi} \\ z_{fi} \end{pmatrix} = M_x(\omega_n)M_y(\tau_n)M_z(\varphi_n) \left\{ \begin{pmatrix} A_n \\ B_n \\ C_n \end{pmatrix} + \dots + M_x(\omega_1)M_y(\tau_1)M_z(\varphi_1) \left[\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \right] \right\}, \quad (3)$$

где $M_k(\xi_i)$ – матрицы преобразований поворота систем координат вокруг осей $k = (x, y, z)$ на углы $\xi_i = (\omega_i, \tau_i, \varphi_i)$;

$\omega_i, \tau_i, \varphi_i$ – угловые параметры начальной установки инструмента относительно заготовки зубчатого колеса и параметры его формообразующего движения;

A_i, B_i, C_i – величины переноса координат по трем осям, аналогично угловым параметрам – параметры начальной установки и движения инструмента;

Применительно к данной задаче необходимо выполнить последовательно следующие преобразования систем координат. Во-первых, необходимо перенести точки вокселей фрезы на расстояние ее радиуса в направлении, обратном к оси ординат (B_1). Во-вторых, необходимо повернуть такие точки на угол 180° ($M_z(\varphi_1)$), что связано с фактом обращения зубьев фрезы к оси заготовки зубчатого колеса. В-третьих, необходимо снова перенести точки фрезы вдоль оси ординат на расстояние, равное радиусу окружности впадин зубчатого колеса (B_2). В-четвертых, необходимо повернуть точки фрезы на угол установки фрезы для обработки винтовой канавки косозубого колеса ($M_y(\tau_1)$). При необходимости можно сместить точки фрезы вдоль ее оси, то есть использовать третий параметр ее установки. В нашем случае, как видно из третьей строки формулы (1), фреза моделировалась симметрично оси ординат, так же, как выполнялось моделирование при решении прямой задачи.

Далее необходимо выполнить моделирование движения формообразования фрезой. В процессе фрезерования косозубого колеса, например, на горизонтально-фрезерном станке с использованием делительной головки и ее вращения от гитары шестерен с приводом их от винта подачи стола станка, фреза перемещается вдоль оси ординат с одновременным вращением вокруг нее. Такие перемещение и вращение дают винтовое движение фрезы относительно заготовки зубчатого колеса. Очевидно, что угол наклона касательной к винтовой линии такого движения должен быть равен углу наклона зуба зубчатого колеса. При этом цилиндр, на котором расположена данная винтовая линия, должен касаться цилиндра зубчатого колеса, на котором выполняется определение соответствующего угла для винтовой линии зуба колеса. Расчет шага винтовой линии и связанного с ним винтового параметра винтовой линии выполняется по общеизвестным формулам, включающим в себя указанный выше угол и диаметр цилиндра с расположенной на нем винтовой линией. Также очевидной является и взаимосвязь величины дискреты перемещения фрезы $\Delta p(\tau_2) = p \cdot \Delta \tau_2$ с ее поворотом относительно оси колеса $\Delta \tau_2$, где p – отмеченный выше винтовой параметр. Остальные параметры универсальной зависимости (3) принимаются равными нулю.

На третьем этапе расчетов необходимо определить профиль впадины зубчатого колеса, который будет сформирован ранее рассчитанной фрезой. Очевидно, что нет необходимости выполнять операцию разности множеств цилиндрической заготовки зубчатого колеса и полученного множества точек вокселей множеств фрезы при ее формообразующем движении. Достаточно выбрать точки сечения последнего множества в требуемом сечении. Таким сечением может быть сечение в плоскости параллельной торцовой плоскости цилиндра зубчатого колеса. Эта плоскость оказывается удобной, поскольку в ней хорошо отражается профиль впадины колеса в его исходной CAD-модели. Для выбора указанных точек из общего их множества достаточно установить интервал выборки: $y_e < y_i \leq y_{e+1}$, где $y_e = (-\min\{y_i\} + \max\{y_i\})/2$.

Результаты дискретного твердотельного моделирования. Приведенные выше формулы позволили получить множество точек фрагмента дисковой фрезы (рис. 5, а, б, в).

Множество точек фрагмента внутри ИИП фрезы при ее винтовом движении с заданной дискретой образует семейство таких фрагментов и их точек (рис. 5, г). Выбранные двумя секущими

Численные методы моделирования

плоскостями, параллельными плоскости $y = 0$ системы координат зубчатого колеса, точки образуют профиль, который соответствует профилю впадины зубчатого колеса. Как видно на рис. 5, д полученный множеством точек профиль и исходный профиль достаточно хорошо совпадают. Следовательно, полученная моделированием прямой задачи дисковая модульная фреза позволит получить требуемое косозубое колесо.

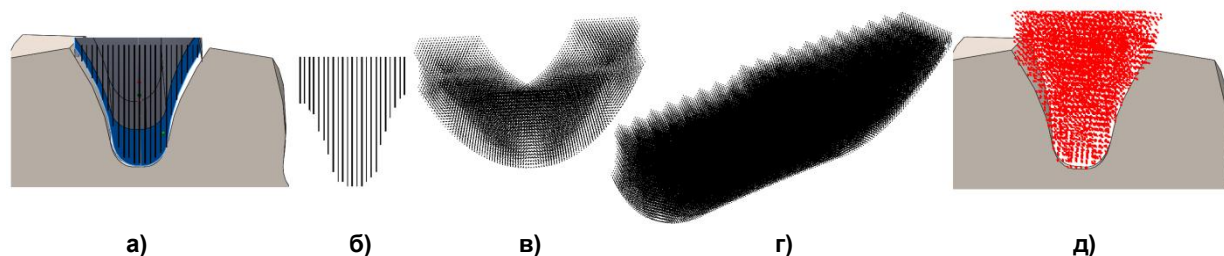


Рис. 5. Профиль впадины зубчатого колеса из CAD-системы и профили фрезы из CAD-системы и расчетного множества точек (а), отдельно последний профиль (б), фрагмент множества точек внутри ИИП фрезы (в), семейство из последнего множества при формообразующем движении фрезы (г), наложение точек сечения семейства на впадину зуба колеса в его торцовом сечении (д)

3. Обсуждение полученных результатов CAD-моделирования. В отличие от традиционных подходов с использованием аналитических методик расчетов, в которых первоначально рассчитывается исходная инструментальная поверхность, а далее решаются вопросы формирования стружечных канавок и затылования, данная методика традиционного твердотельного моделирования с использованием CAD-системы имеет ряд преимуществ. Во-первых, данный способ представляется более практичным. Он не требует освоения инженером механообрабатывающего производства достаточно сложных методик расчета, их программирования с последующим диагностированием возможных мнимых решений. Метод традиционного твердотельного моделирования достаточно нагляден и сравнительно нетрудоемок. Недостатком данного метода являются его низкие возможности автоматизации для выявления оптимальных решений по трем параметрам установки инструмента. Кроме того, устойчивость получения решений все еще остается низкой. В ряде случаев наблюдалось появление сообщений о невозможности выполнения расчетов. Недостатком этого метода является необходимость аппроксимации заданных линий сплайновыми линиями или дугами окружностей, например, замена архимедовой спирали при моделировании затылования. Недостаточно высокая устойчивость расчетов не позволяет выполнить моделирование адекватно реальным объектам, которые получаются в соответствии с технологией их изготовления. Например, как известно, затылование фрез шлифованием выполняется дисковым абразивным инструментом. В данном случае пришлось ограничиться «затылованием» кривой линией, что в определенной степени отвечает затылованию резцом при условии, что его передний угол равен нулю.

Именно поэтому вариант дискретного твердотельного моделирования является более обнадеживающим, поскольку является более гибким и устойчивым в получении любых решений, для любых инструментов, в том числе изношенных или с погрешностями изготовления, и любых формообразующих движений, в том числе с погрешностями движения из-за влияния технологических факторов. Недостатком этого метода является отсутствие в настоящее время коммерческих CAD/CAM-программ с его использованием. В связи с этим применение данного метода требует программирования зависимостей, аналогичных вышеприведенным, что не входит в компетенцию рядовых инженеров-технологов.

Оба метода в настоящее время продолжают развиваться. Следует ожидать, что появившаяся в 2010 г. в Solidworks возможность формирования семейства тел «протягиванием» тела по заданной траектории получит дальнейшее развитие и не только простые по форме выпуклые тела будут рассчитываться для данной операции, но и более сложные тела с выпукло-вогнутым профилем, сплайновые поверхности будут рассчитываться в данной операции. Одновременно с этим рост производительности компьютеров позволит наряду с численными методами решения физических задач (метод конечных элементов, SPH, SPG-методы) решать численными методами и

геометрические производственные задачи, в частности, использовать дискретное твердотельное моделирование на основе воксельных подходов. Такое развитие представляется еще более перспективным в связи с простотой перехода от дискретного (численного) геометрического моделирования к дискретной (численной) реализации решения физических задач технологии машиностроения: расчета деформаций, прочности элементов технологической системы, ее тепловых полей, моделирования процесса стружкообразования и процесса износа инструментов.

Выводы

1. Уровень современного развития классического (аналитического) твердотельного моделирования, реализуемого в графических ядрах коммерческих CAD-систем, включая Solidworks, является достаточным для решения прямой задачи профилирования дисковой модульной фрезы для обработки косозубого колеса.

2. Решение обратной (проверочной) задачи применением классического твердотельного моделирования получить не удалось. Такое решение было получено с использованием дискретного твердотельного моделирования, в котором все тела описываются множествами составляющих их частиц – вокселей. Оба метода позволили подтвердить адекватность таких расчетов.

Литература

1. Radzevich, S.P. *Generation of Surfaces Kinematic Geometry of Surface Machining* / S.P. Radzevich. – Taylor & Francis Group. – 2014. – 683 p.
2. Radzevich, S.P. *Theory of Gearing. Kinematics Geometry and Synthesis* / S.P. Radzevich. – Taylor & Francis Group. – 2013. – 684 p.
3. *Methods of Designing Gear's Machining Tools with the Hyperboloid Cutting Part* / B. Vorontsov, M. Bosansky, I. Kirichenko et al // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 70. – No. 1. – P.135–132. DOI: 10.2478/scjme-2020-0013.
4. Hrytsay, I. *Gears with Asymmetric Tooth Profiles and New Alternative Method of Their Manufacturing* / I. Hrytsay // *Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science*. – 2017. – Vol. 3. – No. 2. – P. 32–37. DOI:10.23939/ujmms2017.02.032.
5. Fetvaci, C. *Generation Simulation of Involute Spur Gears Machined by Pinion-Type Shaper Cutters* / C. Fetvaci // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2010. – Vol. 56. – No. 10. – P. 644–652.
6. Han, Z. *Machining and meshing analysis of face gears by power skiving* / Z. Han, C. Jlang, X. Deng // *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. – 2022. – Vol. 16. – No. 1. – P. 1–15. DOI: 10.1299/jamdsm.2022jamdsm0002/
7. *Mathematical models for manufacturing a novel gear shaper cutter* / S-W. Lin, C-S. Han, J-B. Tan et al. // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2010. – Vol. 24. – P. 383–390. DOI 10.1007/s12206-009-1022-z.
8. Tomori, Z. *A production interference of internal gears – interference at root fillet of shaper cutter* / Z. Tomori, G.V. Bogнар // *XXX. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference*. – 2016. – P. 1–5.
9. *Mathematical modeling of the profile of a gear cutting rolling tool for machining of non-involute gear wheels* / T. E. Tretyak, Y. Gutsalenko, A. Shelkovoі et al. // *Fiabilitate si Durabilitate – Fiability & Durability*. – 2019. – No. 2. – P. 1–11.
10. Kapelevich, A.L. *Shekhtman Fabrication of Directly Designed Gears with Symmetric and Asymmetric Teeth* / A.L. Kapelevich, Y.V. Shekhtman // *Gear technology*. – 2014. – P. 86–91.
11. Lian, G. *Determining the Shaper Cut Helical Gear Fillet Profile* / G. Lian // *Gear technology*. – 2006. – P. 57–67.
12. Fetvaci, C. *Definition of involute spur gear profiles generated by gear-type shaper cutters* / C. Fetvaci // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. – 2010. – Vol. 38. – P. 481–492. DOI: 10.1080/15397734.2010501275.
13. Marinov, S. *Interference of the profiles when meshing internal straight splines with gear shapers* / S. Marinov, O. Alipiev, T. Uzunov // *MATEC Web of Conferences*. – 2019. – Vol. 287. – 01015. DOI: 10.1051/mateconf/201928701015.

14. Ryazantsev, A. *Development of a sophisticated tool for processing parts with an involute profile* / A. Ryazantsev, A. Shirokozuhova, I. Evchenko // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 971. – 022035. DOI:10.1088/1757-899X/971/2/022035.
15. Markowski, T. *Automating the modelling process of involute spur gears with straight teeth* / T. Markowski, J. Mucha, W. Witkowski // *Advances in Science and Technology Research Journal*. – 2013. – Vol. 7. – No. 19. – P. 66–69. DOI: 10.5604/20804075.1062369.
16. Tolvaly-Rosca, F. *Mixed CAD Method to Develop Gear Surfaces Using the Relative Cutting Movements and NURBS Surfaces* / F. Tolvaly-Rosca, Z. Forgo // *Procedia Technology*. – 2015. – Vol. 19. – P. 20–27.
17. Zhang, W. *Digital Generating Method for Cylindrical Helical Gear based on Indexable Disk Milling Cutter* / W. Zhang // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2019. – Under review. DOI: 10.21203/rs.3.rs-708854/v1.
18. Pasternak, S. *Cutting forces in gear machining by disk milling cutters* / S. Pasternak, Y. Danylchenko // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2018. – Vol. 1 (82). – P. 5–11. DOI: 10.20535/2521-1943.2018.82.118609.
19. Huang, C-L. *Profile Analysis of Spur Gear Shaping Cutters Based on Sharpened Cutting Edges* / C-L. Huang, Y-C. Wei // *Machines*. – 2022. – Vol. 10. – No. 484. – P. 1–15. DOI: 10.3390/machines1006048.
20. Litecka, J. *The Design of Gear Hobs Construction* / J. Litecka // *International Journal of Innovation and Scientific Research*. – 2014. – Vol. 6. – No. 1. – P. 1–8.
21. Щуров, И.А. *Расчет точности обработки и параметров инструментов на основе дискретного твердотельного моделирования: монография* / И.А. Щуров. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. – 2004. – 320 с.

Щуров Игорь Алексеевич, д.т.н., первый заместитель директора Политехнического института, профессор, кафедра «Технология автоматизированного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, shchurovia@susu.ru

Поступила в редакцию 28 октября 2022 г.

DOI: 10.14529/engin220406

CALCULATION OF A DISC MILLING CUTTER FOR CUTTING A HELICAL GEAR WITH CLASSICAL (IN SOLIDWORKS) AND DISCRETE SOLID MODELING

I.A. Shchurov, shchurovia@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Designing disk modular cutters for cutting helical gears includes defining the tool profile. The problem of profiling tools that work according to the form-generating method has been solved for decades using analytical, graphic-analytical and graphical approaches. The modern practice of tool design is increasingly based on the use of CAD/CAM/CAE systems. Programs such as Solidworks allow us to create complex solids by stretching an elementary solid along some guide line. This corresponds to the formation of a concave surface of the part by the convex surface of the tool. Thus, at present, a basis has appeared for solving the problem of shaping disk tools using the indicated above CAD or CAM systems. Meanwhile, examples of solving such problems using CAD systems could not be found in the literature. The paper proposes a solution to this problem for the case of profiling a disk cutter when processing a helical gear. The direct problem was solved using one of the most common programs – Solidworks. The inverse problem was solved only using the discrete solid modeling method. The imposition of the original CAD-profile of the gear on the similar wheel obtained by modeling the processing with the calculated

cutter showed their qualitative coincidence. Therefore, these simulation and calculation methods can be applied in the production practice of design work on gear cutting.

Keywords: disk modular cutter, helical gear, profiling, metalcutting, CAD, Solidworks.

References

1. Radzevich S.P. Generation of Surfaces Kinematic Geometry of Surface Machining. Taylor & Francis Group, 2014. 683 p.
2. Radzevich S.P. Theory of Gearing. Kinematics Geometry and Synthesis. Taylor & Francis Group, 2013. 684 p.
3. Vorontsov B., Bosansky M., Kirichenko I. et al. Methods of Designing Gear's Machining Tools with the Hyperboloid Cutting Part. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, vol. 70, no. 1. pp. 135–132. DOI: 10.2478/scjme-2020-0013.
4. Hrytsay I. Gears with Asymmetric Tooth Profiles and New Alternative Method of Their Manufacturing. *Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science*, 2017, vol. 3, no. 2. pp. 32–37. DOI:10.23939/ujmems2017.02.032.
5. Fetvacı C. Generation Simulation of Involute Spur Gears Machined by Pinion-Type Shaper Cutters. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, vol. 56, no. 10. pp. 644–652.
6. Han Z, Jlang C., Deng X. Machining and meshing analysis of face gears by power skiving. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2022, vol. 16, no. 1. pp. 1–15. DOI: 10.1299/jamdsm.2022jamdsm0002/
7. Lin S-W., Han C-S., Tan J-B., Dong S. Mathematical models for manufacturing a novel gear shaper cutter. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, vol. 24. pp. 383–390. DOI 10.1007/s12206-009-1022-z.
8. Tomori Z., Bognar G.V. A production interference of internal gears – interference at root fillet of shaper cutter. *XXX. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference*, 2016, pp. 1–5.
9. Tretyak T.E., Gutsalenko Y., Shelkovoı A. et al. Mathematical modeling of the profile of a gear cutting rolling tool for machining of non-involute gear wheels. *Fiabilitate si Durabilitate – Fiability & Durability*, 2019, no. 2. pp. 1–11.
10. Kapelevich A.L., Shekhtman Y.V. Shekhtman Fabrication of Directly Designed Gears with Symmetric and Asymmetric Teeth. *Gear technology*, 2014. pp. 86–91.
11. Lian G. Determining the Shaper Cut Helical Gear Fillet Profile. *Gear technology*, 2006. pp. 57–67.
12. Fetvacı C. Definition of involute spur gear profiles generated by gear-type shaper cutters. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2010, vol. 38. pp. 481–492. DOI: 10.1080/15397734.2010501275.
13. Marinov S., Alipiev O., Uzunov T. Interference of the profiles when meshing internal straight splines with gear shapers. *MATEC Web of Conferences*, 2019, vol. 287. Number 01015. DOI: 10.1051/mateconf/201928701015.
14. Ryazantsev A., Shirokozuhova A., Evchenko I. Development of a sophisticated tool for processing parts with an involute profile. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2022, vol. 971. Number 022035. DOI:10.1088/1757-899X/971/2/022035.
15. Markowski T., Mucha J., Witkowski W. Automating the modelling process of involute spur gears with straight teeth. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2013, vol. 7, no. 19. pp. 66–69. DOI: 10.5604/20804075.1062369.
16. Tolvaly-Rosca F., Forgo Z. Mixed CAD Method to Develop Gear Surfaces Using the Relative Cutting Movements and NURBS Surfaces. *Procedia Technology*, 2015, vol. 19. pp. 20–27.
17. Zhang W. Digital Generating Method for Cylindrical Helical Gear based on Indexable Disk Milling Cutter. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 2019. Under review. DOI: 10.21203/rs.3.rs-708854/v1.
18. Pasternak S., Danylchenko Y. Cutting forces in gear machining by disk milling cutters. *Mechanics and Advanced Technologies*, 2018, vol. 1 (82). pp. 5–11. DOI: 10.20535/2521-1943.2018.82.118609.
19. Huang C-L., Wei Y-C. Profile Analysis of Spur Gear Shaping Cutters Based on Sharpened Cutting Edges. *Machines*, 2022, vol. 10, no. 484. pp.1–15. DOI: 10.3390/machines1006048.
20. Litecka J. The Design of Gear Hobs Construction. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 2014, vol. 6, no. 1. pp. 1–8.

Численные методы моделирования

21. Shchurov I.A. *Raschet tochnosti obrabotki i parametrov instrumentov na osnove diskretnogo tverdotel'nogo modelirovaniya: monografiya* [Calculation of machining accuracy and tool parameters based on discrete solid modeling: monograph], Chelyabinsk: Publ. SUSU, 2004. 320 p.

Received 28 October 2022

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Щуров, И.А. Расчет дисковой модульной фрезы для нарезания косозубого колеса классическим (в solidworks) и дискретным твердотельным типами моделирования / И.А. Щуров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 52–62. DOI: 10.14529/engin220406

FOR CITATION

Shchurov I.A. Calculation of a disc milling cutter for cutting a helical gear with classical (in solidwork) and discrete solid modeling. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 52–62. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin220406