

4. Замышляева В. В., Смирнова Н. А. Конфекционирование материалов для изделий костюмной группы с учетом свойств дублированных пакетов одежды // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2015. № 5 (359). С. 17–21.
5. Кокшаров С.А., Корнилова Н.Л., Радченко О.В., Никифорова Е.Н. Влияние структурных характеристик термоклеевых материалов на жесткость дублированного пакета // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2016. № 4 (364). С. 96–100.
6. Jevsnik S., Gersak J. Modelling the Fused Panel for a Numerical Simulation of Drape // *Fibers & Textiles in Eastern Europe*. 2004. Vol. 12. № 1 (45). P. 47–52.
7. Замышляева В. В., Смирнова Н. А., Лапшин В. В. Прогнозирование упругих свойств дублированных систем материалов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 2 (374). С. 120–123.
8. Blagodir O., Zolotukhina K., Kushlyk B., Velychko O. Regularities of ink-water balance stability in offset printing // *Computer Sciences and Mathematics. EUREKA: Physics and Engineering*. 2016. Vol. 3. P. 31–37.
9. Gui W., Lu W., Zhang Y., Lin G., Jiang L., Wei T. Gold nanoparticle ink suitable for electric-conductive pattern fabrication using in ink-jet printing technology // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2010. Vol. 358, no. 1–3. P. 35–41.
10. Bohmer M. R., Steenbakkers J. A. M., Chlon C. Monodisperse polymeric particles prepared by ink-jet printing: Double emulsions, hydrogels and polymer mixtures // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2010. Vol. 79, no. 1. P. 47–52.
11. Чижик М. А., Московцев М. Н., Монастыренко Д. П., Доркин Д. В. Гиперспуск: программа для ЭВМ. М. : ФИПС, 2014. № 2014610165 от 09.01.2014.
12. Московцев М. Н. Программная реализация геометрического алгоритма многокритериальной оптимизации // Омский научный вестник. 2014. № 3 (133). С. 15–17.

УДК УДК 004.9:621.9.07:621.833

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ AUTOCAD И ANSYS

#### SIMULATION OF THE FORMING PROCESS AND ANALYSIS OF CUTTING PROCESS OF GEARS, USING THE SOFTWARES AUTOCAD AND ANSYS

А. А. Ляшков, Г. Е. Мурашев

*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

A. A. Lyashkov, G. E. Murashev

*Omsk state technical University, Omsk, Russia*

**Аннотация:** Разработана методология компьютерного геометрического моделирования формообразования изделий с периодическими зубьями, обрабатываемых методом центроидного огибания, без привлечения сложного математического аппарата. При ее использовании, в отличие от известных методик, выполняется моделирование одновременно двух объектов формообразования – обволакивающей и удаляемых объемов. Анализ конфигураций твердотельных моделей срезаемых слоев и их объемов позволяет конструктору целенаправленно назначать оптимальное значение параметра подачи и количество проходов. Ключевым моментом статьи является установление логической связи компьютерного геометрического моделирования удаляемых объемов в среде САПР и анализа стружкообразования в процессе резания с помощью программного обеспечения ANSYS. В настоящей работе показано получение 3D-моделей срезаемых слоев средствами *AutoCAD* и соответствующих им реалистичных моделей стружек, созданных на основе программной системы конечно-элементного анализа процесса резания металла. В связи с существенными сложностями 3D-моделирования процесса резания представляется целесообразным на первом этапе решения поставленной задачи выполнять компьютерное моделирование формообразования срезаемых слоев. Это позволит выбрать оптимальные параметры резания, а значит, ускорить выполнение моделирования процесса резания.

**Ключевые слова:** срезаемые слои, формообразование, твердотельное моделирование, резание.

DOI: 10.25206/2310-9793-7-4-128-135

## I. ВВЕДЕНИЕ

Формообразование поверхности детали осуществляется в процессе ее обработки инструментом путем срезания припуска с заготовки. Поверхность инструмента является производящей, а получаемая поверхность изделия – обработанной. Геометрической моделью обработанной поверхности является огибающая семейства производящих поверхностей. Все многообразие методов определения огибающей семейства линий и поверхностей можно разделить на три группы: графические и графоаналитические, аналитические и численные.

В большинстве практических задач моделирования процесса формообразования изделий, семейство линий и поверхностей не исчерпывается огибающей, а включает особые точки и линии. В этом случае возникает необходимость в определении дискриминант этих семейств, т. е. огибающей и особых элементов. Дискриминанта является первым объектом моделирования формообразования линий и поверхностей. Определение дискриминанты выполняется в основном аналитическими и численными методами. В последнее время активно развиваются методы, основанные на использовании компьютерного геометрического моделирования.

В теории формообразования изделий резанием, кроме огибающей и дискриминанты, используется понятие обволакивающей. «Обволакивающая семейства тел – это граница множества точек, каждая из которых принадлежит хотя бы одному телу семейства» [1, с. 144]. Это понятие введено в связи с тем, что тело производящего инструмента, как правило, ограничено отсеками различных поверхностей. Следовательно, нужно определять огибающие нескольких семейств линий или поверхностей, а затем их стыковать. Кроме того, производящий элемент при реальном формообразовании чаще всего перемещается дискретно, а, значит, обработанное изделие в связи с огранкой будет отличаться от огибающей. Обволакивающая семейства тел – это второй объект моделирования процесса формообразования.

В инженерной практике наряду с определением дискриминанты и обволакивающей часто требуется разрабатывать модели срезаемых слоев. Анализ качественных характеристик и количественных параметров этих слоев позволяет назначить оптимальные технологические параметры формообразования изделия инструментом. Тогда модели срезаемых в процессе формообразования слоев являются третьим объектом моделирования формообразования.

Моделированию первого и второго объектов формообразования посвящено большое количество работ [2, 3, 4] и многие другие. Основы моделирования третьего объекта формообразования применительно к изделиям, обрабатываемым по методу огибания, заложены в работе [5]. Однако предложенное решение не дает полного представления о срезаемых объемах. В то же время геометрическая характеристика удаляемого объема оказывает существенное влияние на силу резания [6], а она повлияет на срок службы инструмента и качество обработки изделия. В работе [7] высказано предположение, что на силы резания оказывает влияние, как форма срезаемых слоев, так и величина объемов этих слоев. Однако исследованиям в этом направлении посвящено немного работ. Выходом из данного положения может быть разработка соответствующего математического обеспечения, позволяющего моделировать срезаемые слои [8]. Однако такой подход трудоемок, не обладает наглядностью и не позволяет моделировать процесс резания.

Другое направление решения этой задачи – разработка математической модели формирования схемы резания, которая позволяла бы определять размеры удаляемых слоев, с последующей реализацией этой модели средствами САПР. Так, в работе [9] на основе разработанной математической модели схемы резания была получена компьютерная модель формообразования винтовой канавки инструментом прямого профиля. Схема резания иллюстрируется в торцовом сечении винтовой канавки, по которой и анализируются размеры удаляемых слоев. Предложенное решение не дает полной информации, как о форме срезаемых слоев, так и об их объемах и распространяется только на конкретный тип инструментов.

В настоящее время исследования срезаемых слоев и процесса резания проводятся в основном в двух направлениях: первое основано на компьютерном геометрическом твердотельном моделировании процесса формообразования изделия инструментом средствами CAD [4], [9, 10, 11], а второе посвящено исследованию процесса резания с помощью CAE систем [6, 7], [13–18]. В работах второго направления предлагаются конечно-элементные модели системы заготовка-инструмент, в которых инструмент идеализирован как 2D твердое тело. Отмечается, что физические явления, связанные с процессом резания изделия инструментом, при этом очень сложны, особенно при 3D-формообразовании, требуют совершенствования известных решений проблемы и разработок новых.

В целом, в известных нам литературных источниках не рассматривается комплексное использование двух указанных направлений. В связи с этим актуальной задачей является создание методологии исследования формообразования зубчатых изделий инструментом методами компьютерного геометрического моделирования и программной системой конечно-элементного анализа.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью настоящей работы является разработка методологии компьютерного геометрического моделирования срезаемых слоев в процессе формообразования зубьев колес без привлечения сложного математического

аппарата с последующим использованием полученных моделей для проведения анализа процесса резания средствами ANSYS. Задачами исследования являются:

- 1) создание алгоритма компьютерного геометрического моделирования удаляемых объемов с использованием *AutoCAD* применительно к формообразованию зубчатого колеса реечным инструментом;
- 2) апробация созданных алгоритмов и на их основе получение геометрических компьютерных моделей срезаемых слоев;
- 3) разработка методологии анализа процесса резания зубчатого колеса реечным инструментом, на основе результатов твердотельного компьютерного моделирования формообразования, средствами САЕ системы.

### III. ТЕОРИЯ

#### 5. Формообразование зубчатого колеса инструментальной рейкой

В основу компьютерного моделирования процесса формообразования цилиндрических деталей с периодическим профилем положен контур инструментальной рейки. Тогда профиль детали является огибающей семейства профилей рейки. Это семейство образуется в результате качения начальной прямой рейки по окружности детали (рис. 1).

В процессе относительного движения центроида рейки катится без скольжения по центроиде колеса. Движение рейки можно разделить на две составляющие: вращение начальной прямой вокруг центра  $O_1$  центроида заготовки на угол  $\varphi$  и смещение рейки по касательной к центроиду на расстояние, равное  $R \cdot \varphi$  (рис. 1). В результате профиль зуба колеса является огибающей семейства профилей рейки. Уравнения семейства имеют вид [12]

$$\begin{aligned} x &= x_1(t) \cdot \cos \varphi + y_1(t) \cdot \sin \varphi + R \cdot (\sin \varphi - \varphi \cdot \cos \varphi), \\ y &= -x_1(t) \cdot \sin \varphi + y_1(t) \cdot \cos \varphi + R \cdot (\cos \varphi + \varphi \cdot \sin \varphi), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x_1 = x_1(t)$ ,  $y_1 = y_1(t)$  – уравнения профиля рейки,  $\varphi$  – параметр семейства,  $R$  – радиус центроида колеса.

Уравнения (1) являются основой как для определения огибающей семейства конгруэнтных линий аналитическими методами, так и для разработки алгоритма компьютерного твердотельного моделирования обволакивающей семейства моделей профилей, ограниченных этими кривыми.

При компьютерном моделировании относительное движение модели рейки, определяющее кинематическую схему формообразования, задается следующим алгоритмом: модель рейки поворачивается вокруг оси, проходящей через точку  $O_1$  и перпендикулярной плоскости заготовки, на угол  $\Delta \varphi$ ; величина приращения угла  $\varphi$  (рис. 2) ( $\Delta \varphi$  – параметр резания) для получения множества профилей задается конструктором; объект сдвигается параллельно вектору  $\vec{m}(-R \cdot \cos \Delta \varphi, R \cdot \sin \Delta \varphi, 0)$  на величину  $R \cdot \Delta \varphi$ .

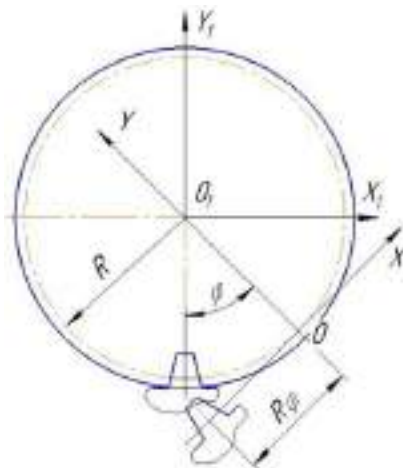


Рис. 1. Кинематическая схема формообразования

После задания границ изменения параметра  $\varphi$ , а также величины его приращения  $\Delta \varphi$  выполняется моделирование процесса формообразования. Взаимодействие твердотельных моделей рейки и заготовки осуществляется на основе использования булевых операций. Пример моделирования приведен на рис. 2. Полученная боковая поверхность профиля является обволакивающей поверхностью. Она будет приближаться к огибающей поверхности с уменьшением параметра  $\Delta \varphi$  при выполнении условий формообразования.



Рис. 2. Модели инструмента и заготовки в процессе формообразования

#### б. Твердотельное моделирование срезаемых слоев

Разработанные алгоритмы и программы твердотельного моделирования формообразования наряду с получением сопряженного профиля [4], [10, 11] позволяют проследить процесс последовательного вырезания впадин между профилями зубьев изделия, конфигурацию срезаемого слоя и загруженность участков режущих кромок. Предлагаемое моделирование позволяет получить не только качественные характеристики процесса резания, но и некоторые количественные параметры: объем удаляемого слоя за один двойной ход инструмента; объем слоя, удаляемого периферийной и боковыми режущими кромками; установить зависимость удаляемых объемов от значения параметра резания  $\Delta \varphi$  и некоторые другие. Анализ этих параметров уже на первом этапе исследования процесса резания позволит предложить оптимальные значения параметра резания, количество проходов, а также значение глубины резания для каждого прохода.

Отмеченные выше возможности иллюстрируются рисунками. Так, на рисунке 3 показана модель заготовки зубчатого колеса и модели слоев, снимаемые инструментом за один проход. Из этого рисунка можно получить качественные характеристики о толщине и форме среза, снимаемого периферией и боковыми сторонами профиля зуба инструмента. Он дает представление об изменении формы и толщины срезаемых слоев по мере внедрения инструмента в заготовку. В частности, конфигурации сечений срезаемых слоев сложны и изменяются при внедрении инструмента в заготовку. Различные участки зуба инструмента неодинаково нагружаются, так как они срезают слои различных объемов. При этом в процессе формообразования одновременно могут участвовать несколько зубьев инструмента. Так, на рис. 4 показано формообразование двух впадин между зубьями изделия двумя зубьями инструмента за его один проход. Удаляемый объем состоит их трех фрагментов, два из которых срезаются одним зубом инструмента.

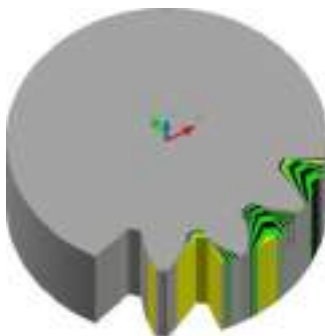


Рис. 3. Модель колеса вместе с моделями удаляемых слоев

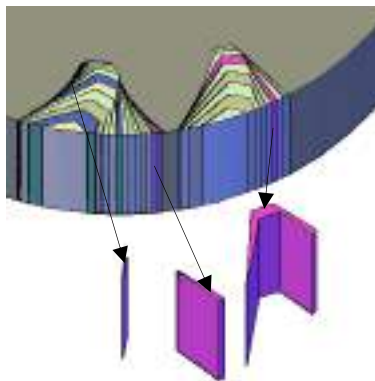


Рис. 4. Модель фрагмента колеса вместе с моделями удаляемых слоев за один проход инструмента

В большинстве случаев изготовление зубчатого изделия выполняется не за один проход (рис. 4), а за несколько. Так, на рисунке 5 показан фрагмент зубчатого колеса после первого (из двух) прохода. Из него следует, что, как и в рассмотренном выше случае, в формообразовании участвуют два зуба инструмента, но срезаемые объемы состоят из двух фрагментов.

Таким образом, анализ конфигураций удаляемых слоев и их объемов позволяет конструктору предварительно целенаправленно назначать как значение параметра подачи, так и количество проходов. Окончательное решение целесообразно принимать после проведения исследований процесса резания, методология которого приводится ниже.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения эксперимента по анализу процесса резания в рассматриваемой задаче использован один зуб реечного инструмента; расположен он в промежуточном положении процесса формообразования, причем так, что стружка снимается периферией и боковыми сторонами профиля зуба инструмента. Для моделирования формообразования резанием предлагается использовать CAE систему ANSYS. Как известно, в настоящее время метод конечных элементов является основным инструментом по моделированию процесса резания. Он имеет ряд преимуществ [17, 18], в частности: предсказание сил резания и формы стружки; он исследует проблемы контакта между телами и ряд других. В большинстве исследований с использованием этого метода модель инструмента рассматривается как 2D твердое тело [13, 15], т. е. решается плоская задача деформации. В настоящей работе в процессе формообразования одновременно участвуют три режущие кромки. В связи с этим поставленную задачу можно рассматривать как пространственную с возможностью получения новых практических результатов.

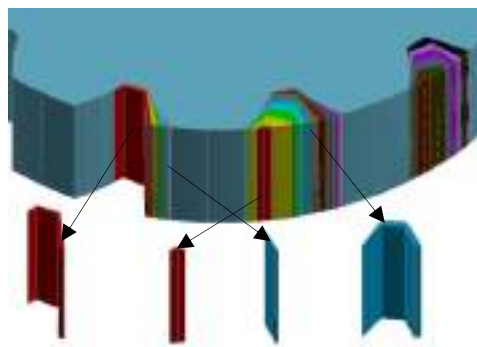


Рис. 5. Модель фрагмента колеса вместе с моделями удаляемых слоев за два прохода инструмента

На первом этапе моделирования указанной геометрии при соблюдении режимов резания необходимо разбить модель на элементы (рис. 6). Задаем основной массив крупных элементов для оптимизации и ускорения расчетов, устанавливая размер одного элемента 1 мм (*element size*). Дополнительно для заготовки и инструмента задаем метод разбиения – *MultiZone* с параметром *Mapped Mesh Type–Hexa*. Такое разбиение рациональнее разделяет на элементы нужный нам объем, в, следствие, чего уменьшается время расчета и повышается его точность. Так как в месте соприкосновения инструмента и заготовки необходима максимальная точность расчетов и моделирования процесса стружкообразования, задаем размер элемента сетки в зоне контакта 0,15 мм. В результате получаем оптимальную сетку, позволяющую производить на ней быстрые и точные расчеты процесса резания.

Модели заготовки и инструмента после их разбиения на элементы и задания необходимых режимов резания используются для моделирования процесса формообразования, что иллюстрируется рис. 7, на котором показан инструмент в трех положениях, при последовательном врезании в заготовку. Из рис. 7а следует, что на первом этапе происходит разделение стружки на три части, образующиеся при срезании материала заготовки тремя режущими кромками инструмента. Также видно, что в начале резания происходит смятие стружки. На втором этапе наиболее полно можно увидеть картину распределения эквивалентных напряжений по заготовке и образующейся стружке. Напряжения распределяются по всей заготовке вблизи резания, однако наибольшие напряжения возникают в зоне отделения стружки от заготовки и уменьшаются при удалении от этой зоны. На третьем этапе происходит откол стружки от заготовки и наблюдается самая большая по площади зона больших напряжений, вследствие чего трещина при таком отколе может распространяться непредсказуемо и повлечь за собой некоторые отклонения от требуемой геометрии срезаемого слоя.

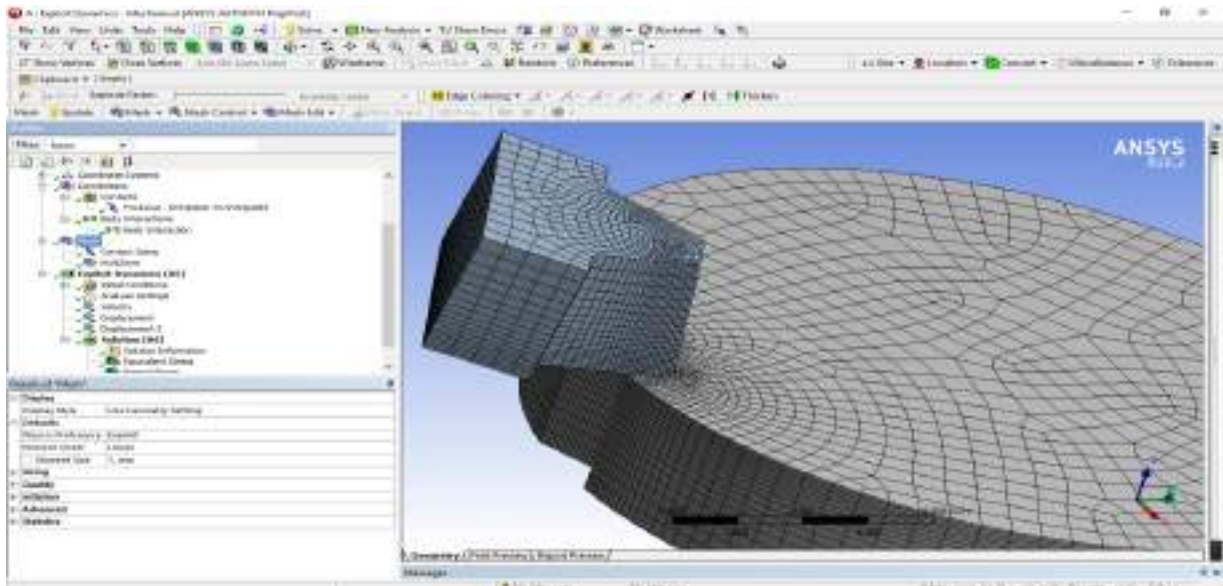
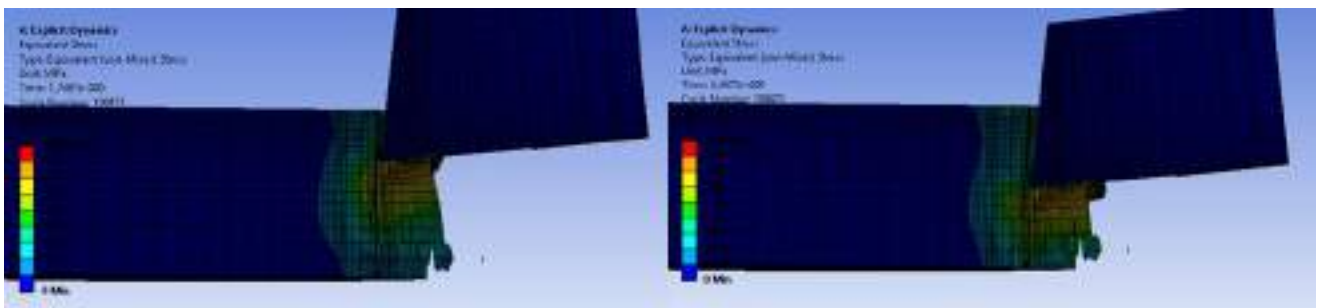


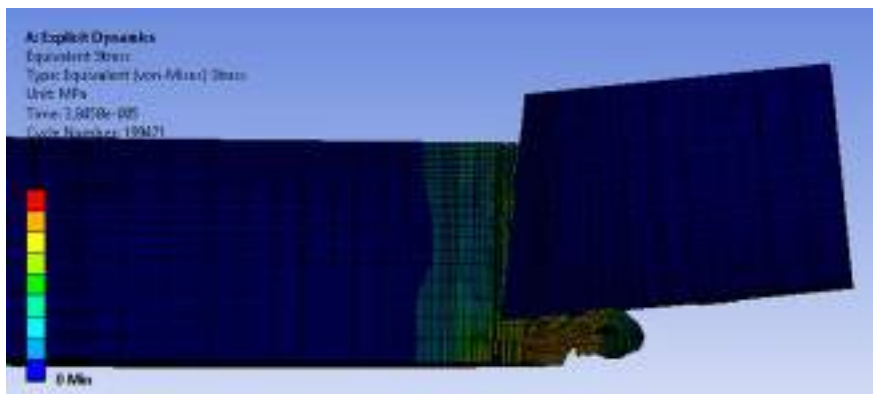
Рис. 6. Модели заготовки и зуба рейки на этапе их разбиения на элементы

В целом, в процессе резания можно видеть начальный этап моделирования, при котором образование стружки происходит неоднородно, а также наблюдается ярко выраженное разделение стружки на три части, срезаемые тремя режущими кромками зуба рейки. Эквивалентные напряжения распределяются от зоны резания по заготовке в направлении движения инструмента, но наибольшие напряжения возникают именно в зоне резания на протяжении всего процесса моделирования. Для получения большей наглядности результата моделирования стружка рассечена продольной плоскостью, проходящей по плоскости симметрии зуба рейки, и вынесена как отдельный геометрический объект (рис. 8). Эти рисунки позволяют получить достаточно полное представление о форме стружки и ее преобразованиях на различных этапах перемещения инструмента. Так, анализ контура сечения позволяет сделать вывод о достаточно плавном формообразовании стружки в ее средней части, смятии и разрывах на верхнем и нижнем фрагментах.



а) смещение инструмента на 1,4 мм

б) смещение инструмента на 2,1 мм



с) смещение инструмента на 3,75 мм

Рис. 7. Визуализация трёх этапов формообразования 3D модели стружки

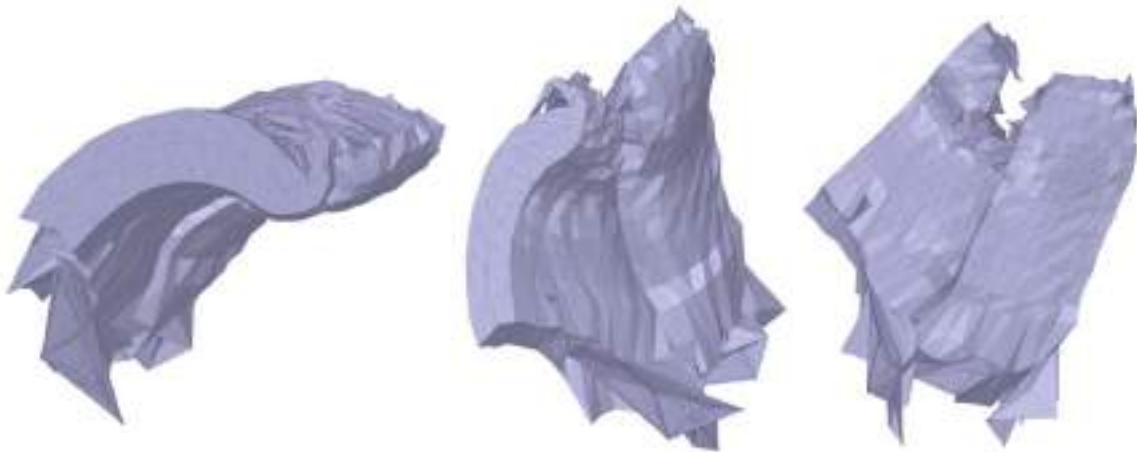


Рис. 8. 3D-модели стружки при различных направлениях их проецирования

#### V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изготовление зубчатых изделий предполагает решение ряда задач. Одна из них связана с получением моделей удаляемых объемов для назначения, например, оптимальных параметров подачи и числа проходов при изготовлении деталей, обрабатываемых методом огибания. Эта задача наиболее успешно решается с использованием компьютерного геометрического моделирования средствами САПР по разработанным исследователями алгоритмам и программам.

Вторая задача посвящена моделированию непосредственно процесса изготовления изделия. В этом случае исследование процесса резания средствами САЕ систем позволяет назначить оптимальные параметры резания с целью разработки режущего инструмента. В известных авторам литературных источниках указанные задачи решаются не связано, с различной глубиной проработки. В настоящей работе показана взаимосвязь таких задач при моделировании различных этапов подготовки к изготовлению зубчатого изделия реечным инструментом. Авторами предполагается проведение дальнейших исследований как по компьютерному твердотельному моделированию срезаемых объемов, так и процесса резания в их логической взаимосвязи для обработки различных зубчатых изделий.

#### VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методология компьютерного геометрического моделирования двух объектов формообразования – обволакивающей и срезаемых слоев в процессе формообразования изделий с периодическими зубьями, обрабатываемых методом центроидного огибания, без привлечения сложного математического аппарата. Анализ конфигураций твердотельных моделей удаляемых слоев и их объемов позволяет конструктору целенаправленно назначать оптимальное значение параметра подачи и количество проходов. Модели полученных слоев в дальнейшем применяются для анализа процесса резания зубчатого колеса реечным инструментом средствами САЕ системы. Такое двухступенчатое исследование позволяет оптимизировать не только параметры формообразования, но и параметры резания, что будет способствовать разработке режущего инструмента с эффективными параметрами. В целом, если компьютерное моделирование удаляемых объемов для ряда задач разработано на высоком уровне, то технология моделирования образования стружки все еще находится на ранней стадии практического использования. Авторы планируют в будущем продолжить исследования по более эффективно использованию результатов моделирования, как удаляемых объемов, так и стружкообразования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевелева Г. И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. М.: Мосстанкин, 1999. 494 с.
2. Litvin F.L., Fuentes A. Gear Geometry and Applied Theory, 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 2004. 800 p.
3. Залгаллер В. А. Теория огибающих. М.: Наука, 1975. 104 с.
4. Xiaochu TANG, Fangshu REN, Yang JIANG and Sande GAO Geometric modeling and dynamic simulation of involute gear by «Generation method» // 13<sup>th</sup> International conference on geometry and graphics. August 4–8, 2008, Dresden (Germany). 7 p.
5. Шишков В. А. Образование поверхностей резанием по методу обкатки. М.: Машгиз. 1951. 392 с.
6. Lin, Liang Guan, Mingming Lu, Jinguo Han, Yudi KanSchool. 2017 Modeling and analysis of the chip formation and transientcutting force during elliptical vibration cutting process Jieqiong. URL: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5006303>.

7. Zhang C., Ehmann K., Li Y. Analysis of cutting forces in the ultrasonic elliptical vibration-assisted micro-groove turning process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 78 (1–4). P. 139–152.
8. Кондусова Е. Б. Трехмерное геометрическое моделирование съема припуска, формообразования и проектирования инструментов при обработке резанием: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Киев : НТУУ «Киевский политехнический институт». Киев. 1999. 35 с.
9. Петухов Ю. Е. Профилирование режущих инструментов в среде T-flex CAD-3D // Вестник машиностроения. 2003. № 8. С. 67–70.
10. Dimitriou A. Antoniadis. CAD-based simulation of the hobbing process for the manufacturing of spur and helical gears V // Int J Adv Manuf Technol DOI Received : 20 May 2007. Accepted : 28 February 2008, Springer-Verlag. London Limited, 2008.
11. Лопатин Б. А., Хаустов С. А. Автоматизированная система моделирования и анализа способов формирования зубьев зубчатых колес // Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение. 2008. № 10 (110). С. 72–77.
12. Ляшков А. А. Моделирование формообразования зубчатых колес методом центроидного огибания // Известия Транссиба. 2012. № 2 (10). С. 109–116.
13. Hortig Christian, Svendsen Bob. Modeling and simulation of chip formation in high speed cutting. 2005. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/pamm.200510114>.
14. Deng W. J., Li C., Xia W., Wei Z. Finite element modeling of formation in orthogonal metal cutting. 2008. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.895.5082&rep=rep1&type=pdf>.
15. Limido J., Espinosa C., Salau'n M., Lacomme J. LSPH method applied to high speed cutting modeling. 2007. URL: [http://oatao.univ-toulouse.fr/219/1/Espinosa\\_219.pdf](http://oatao.univ-toulouse.fr/219/1/Espinosa_219.pdf).
16. Gergely DEZSŐ, János HERMAN, Ferenc. Szigeti two dimensional physical modeling of the cutting wedge. 2012. URL: <http://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2012/ANNALS-2012-1-25.pdf>.
17. Junya OKIDA, Takuichiro TAYAMA, Yosuke SHIMAMOTO and Shinya NAKATA. Application of Chip Formation Simulation to Development of Cutting Tools. 2016. URL: <https://global-sei.com/technology/tr/bn82/pdf/82-08.pdf>.
18. Corina CONSTANTIN, Sorin-Mihai CROITORU, George CONSTANTIN, Eugen STRĂJESCU. Fem tools for cutting process modeling and simulation. 2012. URL: [https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/full1f4\\_156806.pdf](https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full1f4_156806.pdf).

УДК 621.01

### МЕТОД СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ РАСЧЕТА ВЕКТОРА ОБОБЩЕННЫХ СКОРОСТЕЙ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА ПРИ ВИРТУАЛЬНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДВИЖЕНИЯ

### THE METHOD OF REDUCING TIME OF CALCULATION OF GENERALIZED SPEEDS VECTOR OF ANTHROPOMORPHIC ROBOT DURING VIRTUAL MODELING OF MOTION

Ф. Н. Притыкин, В. И. Небритов

*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

F. N. Pritykin, V. I. Nebritov

*Omsk State Technical University, Omsk, Russia*

**Аннотация.** При планировании движения механизма руки антропоморфного робота в организованном пространстве существует необходимость сокращения времени расчета траектории в пространстве обобщенных координат. Указанное время значительно зависит от времени расчета вектора скоростей обобщенных координат на каждом шаге расчетов при синтезе движений. В работе проведены геометрические исследования на основе визуализации закономерностей изменения смещения узловых точек механизма руки антропоморфного робота при реализации мгновенных состояний. На основе геометрического анализа указанных смещений предложен метод, позволяющий сократить время итерационного поиска вектора скоростей обобщенных координат. Результаты расчетов показывают сокращение времени расчета на 20%. Данные исследования могут быть использованы при разработке интеллектуальных систем управления автономными антропоморфными роботами.

**Ключевые слова:** антропоморфный робот; узловые точки механизма; синтез движений манипуляторов; пространство обобщенных скоростей; линейные геометрические объекты пространства обобщенных скоростей.

DOI: 10.25206/2310-9793-7-4-135-140