DOI: 10.31897/PMI.2019.1.60

УДК 621.9.042

СПЕЦИАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ КОНИЧЕСКИХ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ОДНОВИНТОВЫХ КОМПРЕССОРОВ

А.С.ВАСИЛЬЕВ, А.А.ГОНЧАРОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

В статье рассмотрены проблемы, возникающие при формообразовании сложнопрофильных конических винтовых поверхностей. Данные поверхности образуют геометрию рабочих органов одновинтовых миниатюрных компрессоров, имеющих большие перспективы применения в мобильных миниатюрных компрессорных установках, что особенно актуально для медицинской и космической техники, робототехники, нефтегазовой и горной промышленности. Ввиду того, что возможности существующих CAD-систем не позволяют получать трехмерные модели данных поверхностей, возникает проблема подготовки управляющей программы для станка с ЧПУ, так как расчет траектории инструмента в CAM-системах при обработке сложнопрофильных поверхностей невозможен без трехмерной модели поверхности. Для решения проблемы была разработана система автоматизированного программирования, реализующая формализованный расчет траектории инструмента в соответствии с предложенной специальной стратегией обработки конических винтовых поверхностей. В качестве исходных данных для расчета траектории инструмента системе необходима информация о геометрии инструмента и винтовой поверхности в параметрическом виде, что позволяет отказаться от построения трехмерной модели поверхности. Приведены результаты обработки опытных образцов по предложенной стратегии.

***Ключевые слова*:** стратегия обработки; система автоматизированного программирования; программирование обработки на станках с ЧПУ; непрофилированный инструмент; сложнопрофильная коническая винтовая поверхность; одновинтовой компрессор

***Как цитировать эту статью*:** Васильев А.С. Специальная стратегия обработки сложнопрофильных конических винтовых поверхностей рабочих органов одновинтовых компрессоров / А.С.Васильев, А.А.Гончаров // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 60-64. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.60

Введение. Во многих областях промышленности все чаще возникает потребность в компактных мобильных компрессорных установках. Такие установки особенно актуальны для нужд медицинской и космической техники, робототехники, нефтегазовой и горной промышленности [6]. На данный момент существует большое количество разнообразных конструкций компрессоров, но наиболее перспективными с точки зрения компактности являются одновинтовые компрессоры (рис.1). В качестве рабочего органа в данной конструкции используется коническая винтовая пара, которая состоит из конического винтового ротора, вращающегося внутри конической винтовой обоймы (рис.2). Такая конструкция была предложена еще в 1934 г. французским ученым Рене Муано [5], реализована идея в 2016 г. шотландской компанией VERT Rotor [9].

Отличительной особенностью данной конструкции является высокая объемная производительность по сравнению с другими типами компрессоров. Так, например, при одинаковых выходных характеристиках одновинтовой компрессор с конической парой в 4-6 раз компактнее традиционного двухвинтового компрессора. Кроме того, устройства данного типа отличаются низким уровнем вибраций и шума. Данные особенности обуславливают высокий потенциал одновинтовой конструкции на рынке компрессорного оборудования [7].

Постановка проблемы. Основной технологической задачей при производстве одновинтового компрессора является изготовление миниатюрной конической винтовой пары. Геометрия винтовой поверхности деталей конической пары имеет сходство с поверхностями рабочих органов героторных насосов, широко используемых в промышленности. Отличительными особенностями конической пары являются изменяющийся шаг, диаметр сечения и эксцентриситет винтовой поверхности. Изменения шага, эксцентриситета и диаметра связаны некоторыми функциональными зависимостями, которые определяют характеристики винтовой пары (объемный расход, степень сжатия и т.п.).

Технологические возможности большинства методов обработки винтовой поверхности роторов героторных насосов не позволяют обрабатывать конические винтовые поверхности из-за

DOI: *10.31897/PMI.2019.1.60*

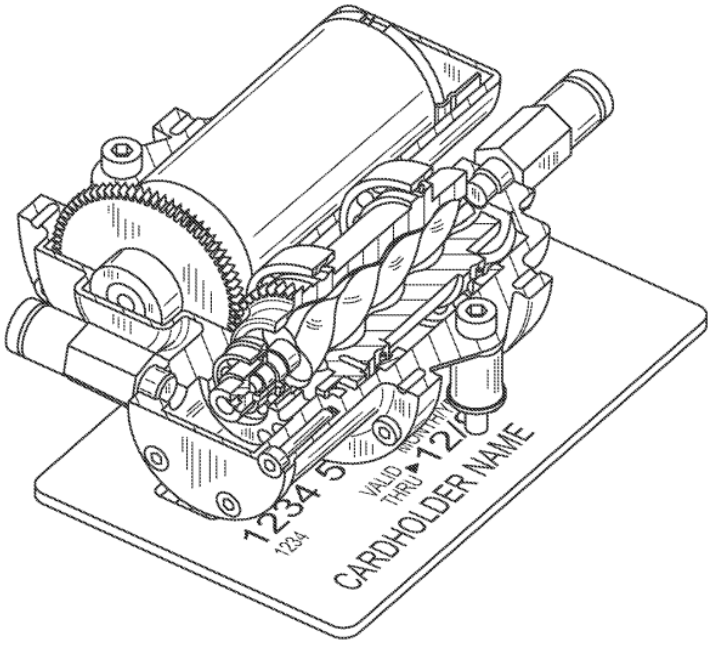


Рис.1. Миниатюрный одновинтовой компрессор с конической винтовой парой



Рис.2. Коническая винтовая пара

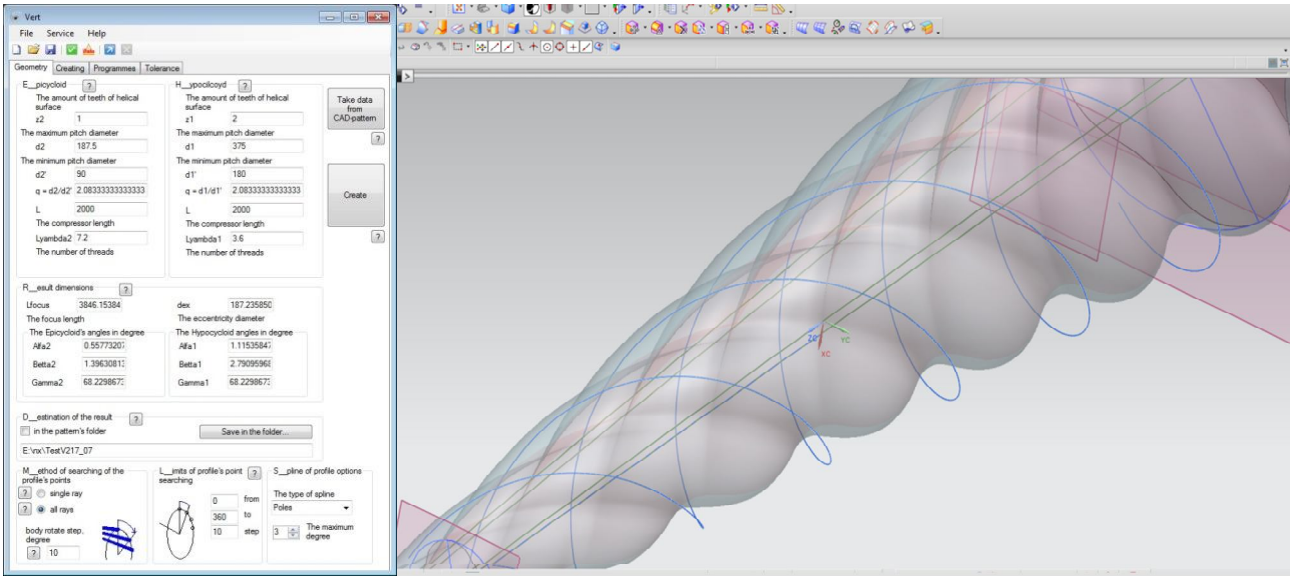


Рис.3. Специализированная CAD-система для проектирования конических винтовых пар

их конструктивных особенностей: переменного шага, эксцентриситета и диаметра сечения. Реализация обработки данного типа поверхностей возможна только за счет обработки непрофилированным инструментом на станках с ЧПУ [2].

Обработка сложнопрофильной поверхности на станке с ЧПУ предполагает подготовку управляющей программы с использованием трехмерной модели поверхности. При этом технолог-программист выбирает какую-либо из доступных в CAM-системе стандартных стратегий обработки, которые зачастую не позоляют обеспечить требуемые точность и качество поверхности [4, 8]. В случае с коническими винтовыми поверхностями создание виртуальной модели поверхности – весьма трудоемкая задача, которую не представляется возможным реализовать в стандартных CAD-системах. Компания VERT Rotor, которая на данный момент является единственным производителем одновинтовых компрессоров, разработала специализированную CAD-систему (рис.3), позволяющую оператору задать требуемые размеры, степень сжатия и допуски. Программное обеспечение автоматически создает модель винтовой поверхности, представляю-

DOI: 10.31897/PMI.2019.1.60

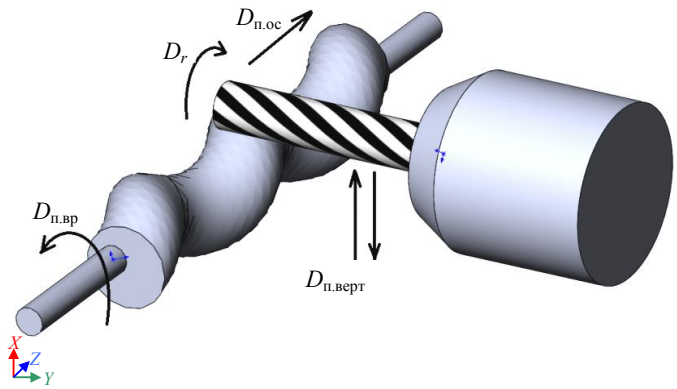


Рис.4. Схема обработки винтовой поверхности по специальной стратегии

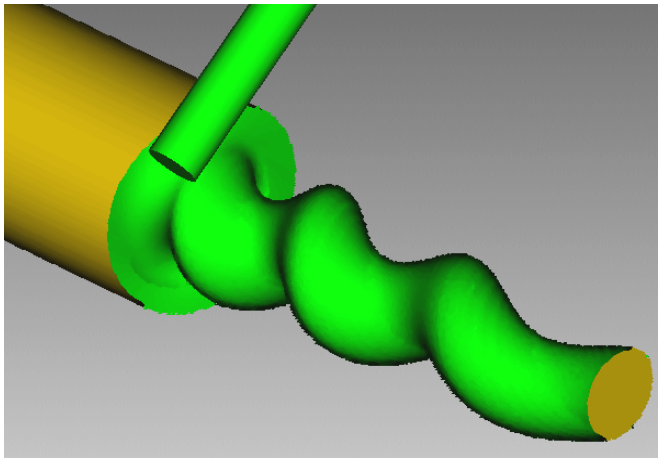


Рис.5. Общий вид конической винтовой поверхности с круглым поперечным сечением

щую собой 3D-модель CAD, которую можно отправить в пакет CAM для программирования обработки [10].

При разработке управляющей программы в CAM-системе в распоряжении технолога есть только стандартные стратегии, при использовании которых не всегда возможно обеспечить заданные параметры точности и качества винтовой поверхности, сохраняя достаточную производительность обработки.

Специальная стратегия обработки винтовых поверхностей. Известна специальная стратегия обработки винтовых поверхностей роторов винтовых насосов [1], которая позволяет производить обработку винтовой поверхности с постоянными параметрами шага, эксцентриситета и диаметра сечения винтовой поверхности (рис.4). Стратегия удобна тем, что позволяет получать траекторию движения инструмента по форматизированному алгоритму, который использует данные о геометрии инструмента и обрабатываемой поверхности в параметрическом виде. На базе данного алгоритма была создана система автоматизированного программирования, позволяющая оперативно получить G-код управляющей программы для винтовой поверхности с произвольными параметрами.

В случае использования данной стратегии для обработки конических винтовых поверхностей необходимо внести в формализованный алгоритм зависимости, определяющие взаимосвязи изменения шага, эксцентриситета и радиуса сечения поверхности. Для примера рассмотрим вариант обработки конической винтовой поверхности с круглым поперечным сечением (рис.5).

Основной рабочей характеристикой машин объемного типа является объемный расход, который для одновинтовых насосов определяется выражением [3]:

$$Q = Shn, \quad (1)$$

где S – эффективная площадь поперечного сечения винтовой пары; h – шаг винтовой поверхности; n – частота вращения ротора.

Эффективная площадь поперечного сечения винтовой пары в рассматриваемом случае круглого сечения определяется следующим образом:

$$S = 4ed, \quad (2)$$

где e – эксцентриситет винтовой поверхности; d – диаметр сечения винтовой поверхности.

Представленные зависимости справедливы для одновинтового насоса, имеющего винтовую пару с постоянными геометрическими параметрами, и сформулированы из условия несжимаемости перекачиваемого вещества. В случае с одновинтовым компрессором геометрия пары должна обеспечивать определенную величину степени сжатия ε, т.е. определенную степень уменьшения рабочего объема V камеры винтовой пары в продольном направлении:

$$\varepsilon = V_1/V_2. \quad (3)$$

DOI: 10.31897/PMI.2019.1.60

При этом рабочий объем выражается через параметры винтового профиля:

$$V = \frac{Q}{n} = 4deh. \qquad (4)$$

Используя приведенные зависимости, а также рассматривая эскиз винтовой поверхности (рис.6), можно записать выражения, определяющие значения геометрических характеристик винтовой поверхности в определенном поперечном сечении, характеризуемом значением X. Таким образом, получаем следующие уравнения для геометрических параметров винтовой поверхности:

$$\begin{cases} D(x) = D_2 + \dfrac{D_1 - D_2}{L}; \\ e = k_в D(x); \\ h = \dfrac{V(x)}{4D(x)e}. \end{cases} \qquad (5)$$

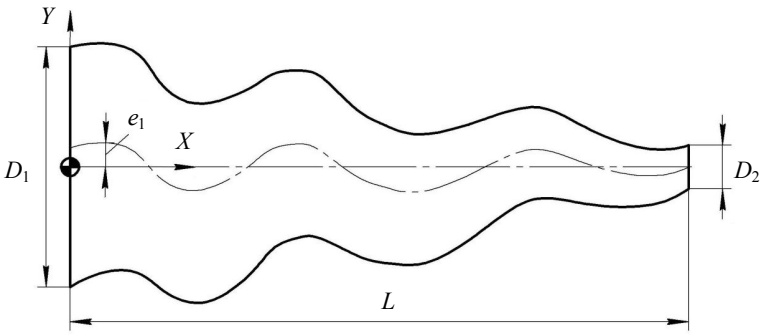


Рис.6. Параметризированный эскиз конической винтовой поверхности

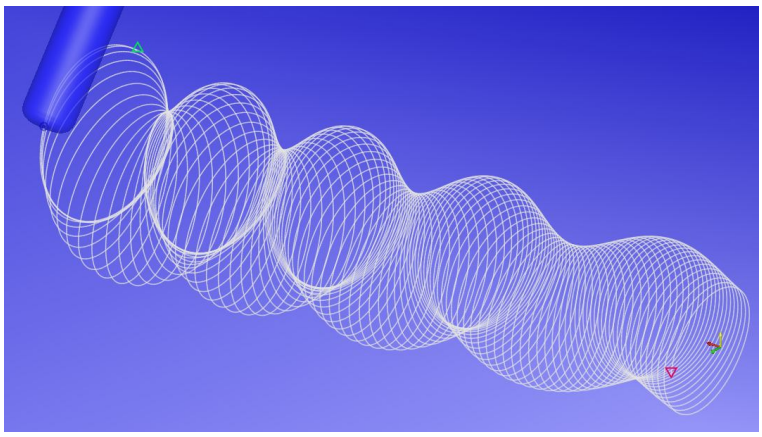

Рис.7. Траектория движения инструмента


Рис.8. Обработанная по предложенной стратегии винтовая поверхность

Экспериментальное подтверждение. Интегрировав функциональные значения геометрических параметров поверхности в существующую автоматизированную систему расчета траектории движения инструмента, получаем управляющую программу для обработки конической винтовой поверхности, представляющую собой текстовый файл с G-кодом. Полученная траектория движения инструмента представлена на рис.7.

Тестовая обработка винтовой поверхности производилась на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ, оснащенном поворотным столом модели HAAS MINI Mill 2. Обрабатывалась винтовая коническая поверхность с наибольшим диаметром сечения 10 мм, базовым шагом 48 мм, базовым эксцентриситетом 3,4 мм, длиной поверхности 100 мм, степень сжатия винтовой пары ε = 1 (без компрессии). Материал заготовки – сплав Д16Т. Режущий инструмент – концевая твердосплавная фреза для обработки алюминиевых сплавов диаметром 6 мм. Результат тестовой обработки представлен на рис.8.

Кроме того, была произведена обработка ряда опытных образцов винтовой поверхности с различными сочетаниями геометрических параметров, предполагающих различную степень сжатия, с различными соотношениями шага и эксцентриситета (рис.9). Эксперименты подтвердили работоспособность предлагаемой стратегии обработки винтовой конической поверхности, а также показали возможность достижения высокого качества поверхности при сохранении высокой производительности обработки.

DOI: *10.31897/PMI.2019.1.60*

а *б*

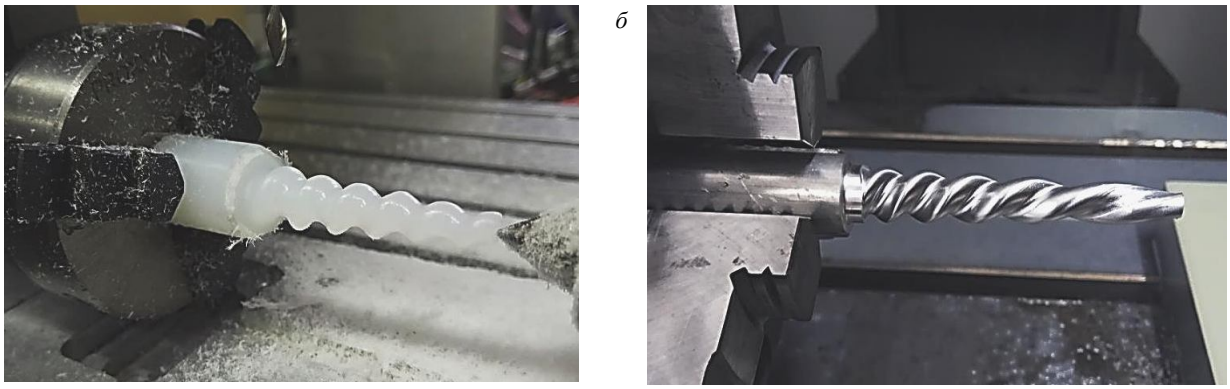


Рис.9. Примеры обработанных поверхностей: *а* – геометрия с высокой степенью сжатия, полипропилен; *б* – геометрия с овальным поперечным сечением, Д16Т

Выводы. В результате проведенных исследований была предложена уникальная стратегия обработки конических винтовых поверхностей, которая была интегрирована в систему автоматизированного программирования управляющей программы для станка с ЧПУ. Система позволяет на основе форматизированного алгоритма производить расчет траектории движения инструмента, опираясь при этом не на трехмерную модель поверхности, а на ее параметрическое описание, что позволяет не выполнять трудоемкое моделирование данных поверхностей в CAD-системах. Опытная обработка ряда поверхностей с различными параметрами показала эффективность использования предложенной стратегии обработки. Следует отметить, что предложенная стратегия позволяет производить формообразование данных сложнопрофильных поверхностей с помощью стандартного непрофилированного инструмента на доступном четырехосевом оборудовании, не требует применения пятиосевых станков с ЧПУ или какого-либо другого специализированного оборудования и инструмента.

Кроме того, было выявлено, что моделирование рассматриваемых поверхностей с помощью стандартных CAD-систем практически невозможно, что в свою очередь вызывает ряд проблем, связанных с метрологической оценкой точности обработки данных винтовых поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гончаров А.А.* Обработка многозаходной винтовой поверхности ротора винтового насоса на фрезерных станках с ЧПУ / А.А.Гончаров, А.С.Васильев, И.Н.Гемба // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2017. № 4. С. 8-16. DOI: 10.14489/hb.2017.04.pp.008-016

2. *Гончаров А.А.* Современные методы обработки винтовых поверхностей роторов винтовых насосов / А.А.Гончаров, А.С.Васильев, И.Н.Гемба // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А.Соловьева. 2017. № 1 (40). С. 202-208.

3. *Рязанцев В.М.* Роторно-вращательные насосы с циклоидальными зацеплениями. М.: Машиностроение, 2005. С. 308-313.

4. Технологическое управление наследованием эксплуатационных параметров качества деталей машин / М.Л.Хейфец, А.С.Васильев, А.И.Кондаков, Л.Танович // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2015. №. 3. С. 10-22.

5. An ultra-low vibration cryocooling kit based on a miniature Rotary Compressor / O.Dmitriev, E.Tabota, I.M.Arbon, G.Santori // 29th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2015. P. 1-5.

6. *Kevin Glass*. Compressors: Small screw drivers. Bitzer UK. 2007. http://www.acr-news.com/compressors-small-screw-drivers

7. *Krasnyi V.A.* Improving wear resistance of friction assemblies of oil-well pumps having seals from directionally reinforced polymer composites / V.A.Krasnyi, V.V.Maksarov // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. № 53(1-2). P. 121-125.

8. Mathematical modelling of cutting process system / J.Olt, O.Liivapuu, V.Maksarov, A.Liyvapuu, T.Tärgla // Springer Proceedings in Mathematics and Statistics. 2016. Vol. 178. P. 173-186.

9. Patent US2085115A US Grant. Gear mechanism / Moineau Rene Joseph Louis. Priority date 1934.05.02.

10. VERT Rotors 3D CAD SOFTWARE// URL: https://vertrotors.wordpress.com/3d-cad-software/ (дата обращения 26.04.2018).

***Авторы*: А.С.Васильев,** *д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, vas@bmstu.ru* (*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия*), **А.А.Гончаров,** *аспирант, al.goncharow@yandex.ru* (*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия*).

Статья поступила в редакцию 23.05.2018.
Статья принята к публикации 13.06.2018.