

УДК 621.04

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КРУГОВЫХ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЗАНИЕМ

*д-р техн. наук, проф. В.А. ДАНИЛОВ, А.А. ЧЕПУРНОЙ, Ю.В. СИТЬКО
(Полоцкий государственный университет)*

Исходя из геометрии круговой винтовой поверхности обоснован выбор ее производящих линий для анализа схем формообразования. Показаны преимущества ее формирования образующей в виде окружности, перемещаемой по винтовой линии. Рассмотрены схемы формирования окружности точечным производящим элементом при сообщении ему сложного или простого исполнительного движения при профилировании поверхности методом следа или двух простых исполнительных движений при профилировании методом касания. Описаны кинематические структуры станков для обработки круговых винтовых поверхностей роторов насосов осциллирующим резцом и охватывающей резцовой головкой. Рассмотрены пути и опыт реализации разработанных технологий формообразования круговых винтовых поверхностей.

Введение. Винтовые поверхности постоянного и переменного шага широко применяются в конструкциях рабочих органов транспортирующих устройств технологического оборудования химической, перерабатывающей, пищевой и других отраслей промышленности [1]. Запасные части для импортного технологического оборудования часто закупаются за рубежом, так как отечественной промышленностью еще не освоено производство соответствующих станков, например, для обработки изделий с круговыми винтовыми поверхностями. Это обстоятельство обуславливает необходимость проведения исследований и опытно-конструкторских работ по созданию необходимого станочного оборудования и разработке импортозаменяющих технологий изготовления таких изделий, в частности, роторов одновинтовых насосов. Решение данной задачи связано с синтезом рациональных методов формообразования круговых винтовых поверхностей и кинематической структуры реализующих их станков, выбором эффективных методов обработки.

Методологические аспекты решения задачи. Задача разработки рациональной технологии формообразования круговых винтовых поверхностей, под которой исходя из современных представлений понимается совокупность метода формообразования поверхности и реализующего его оборудования и инструмента, рассматривается на основе системного подхода и структурной модели способа обработки [2], в соответствии с которой его основными компонентами являются:

- схема формообразования поверхности, определяемая методом ее формообразования, общей и кинематической схемами обработки;
- метод обработки, обеспечивающий удаление с заготовки материала инструментом определенного типа;
- формообразующая система, создающая необходимый поток информации, материалов и энергии.

Данная структура обуславливает необходимость комплексного подхода к решению рассматриваемой задачи как в области формообразования и резания, так и средств их реализации, включая:

- выбор рациональной схемы геометрического представления круговых винтовых поверхностей и преобразования информации от чертежа до обработанной поверхности, определяющего метод формообразования, распределение функции формообразования между инструментальной и кинематической подсистемами;
- синтез рациональной схемы формообразования круговой винтовой поверхности;
- разработку или выбор эффективного метода обработки;
- построение структуры обрабатывающей системы;
- реализацию технологии формообразования.

Геометрия и общие схемы обработки круговых винтовых поверхностей. Детали рабочего органа одновинтового насоса (рис. 1) ограничены круговыми винтовыми поверхностями – наружной однозаходной у стального ротора и внутренней с двумя заходами у статора, выполненного в виде неметаллической втулки. Такая форма рабочих поверхностей обусловлена принципом работы одновинтового насоса, состоящего в том, что при установке ротора в статор один из его заходов остается свободным, и в нем при работе насоса находится перекачиваемая жидкость. При вращении ротор, перемещаясь из одного захода в другой, вытесняет ее по винтовому каналу из статора.

Геометрически круговая винтовая поверхность представляет множество окружностей, центры которых расположены на винтовой линии [3]. В соответствии с кинематическим принципом представления и исследования поверхность рассматривается как след движения одной линии (образующей) по другой (направляющей) [4], поэтому круговую винтовую поверхность можно сформировать относительным перемещением окружности и винтовой линии.

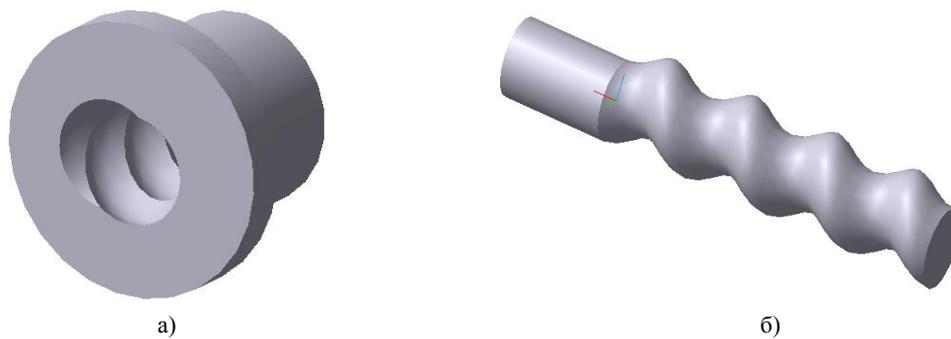


Рис. 1. Детали рабочего органа одновинтового насоса:
а – статор; б – ротор

В зависимости от выбора производящих линий возможны два варианта общей схемы обработки круговой винтовой поверхности: в первом случае образующей является окружность диаметром d , которая перемещается по направляющей в виде винтовой линии L с шагом T (рис. 2); во втором, наоборот, направляющей служит окружность, а образующей – кривая с периодически повторяющейся формой, у которой период равен величине шага T круговой винтовой поверхности. Второй случай реализуется более сложным технологическим оборудованием, поэтому для разработки технологии обработки круговой винтовой поверхности принята схема ее формирования, когда образующей является окружность, а направляющей – винтовая линия. Указанные производящие

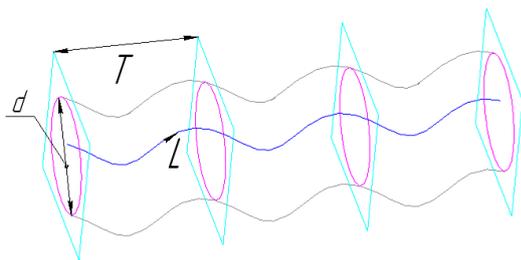


Рис. 2. Геометрия винтовой круговой поверхности ротора

линии круговой винтовой поверхности технически просто создаются на станке как траектории относительного перемещения исполнительных органов, несущих инструмент и заготовку.

Анализ и выбор методов формообразования и обработки круговой винтовой поверхности. Для формирования любой поверхности требуется воспроизведение обрабатывающей системой ее производящих линий, каждая из которых может быть получена методами копирования, следа, касания, обката [5] и сочетанием этих методов [2]. Методы различаются формой производящего элемента и кинематикой формообразования, при этом материальным носителем формы образуемой линии может быть инструмент, кинематика станка или сочетание этих компонентов. Перенесение функции формообразования на инструмент позволяет упростить схему обработки и кинематику станка.

Исходя из требований простоты реализации и универсальности из множества возможных [6, 7] предпочтительны методы формообразования круговых винтовых поверхностей точечным производящим элементом (методы следа и касания). Материальным носителем формы образуемых линий при этих схемах является механика станка, которая должна обеспечивать кинематическое профилирование поверхности в поперечном и продольном направлениях. В рассматриваемом случае обе производящие линии круговой винтовой поверхности (окружность и винтовая линия) создаются кинематически. Производящая винтовая линия, воспроизводимая методом следа, в обоих случаях образуется винтовым движением подачи Φ_S – согласованными вращательным B и поступательным Π движениями, т.е. движением $\Phi_S(B\Pi)$.

Окружность как образующая круговой винтовой поверхности может быть образована различными методами. Наиболее просто она формируется методом следа при перемещении вдоль нее производящей точки, например вершины резца. Это перемещение (движение профилирования) может создаваться вращением производящей точки (простым движением $\Phi_V(B)$) или сочетанием как минимум двух элементарных движений, например, вращательного B_1 и осциллирующего (возвратно-поступательного) O_2 , совершаемых исполнительными органами станка, несущими инструмент и заготовку. Их сочетанием создается движение резания $\Phi_V(B_1O_2)$. В обоих случаях обеспечивается полное формообразование окружности.

Поскольку обе производящие линии (окружность и винтовая линия) образуются методом следа, то круговая винтовая поверхность в целом – методом двойного следа. В качестве режущего инструмента используется токарный резец, которому сообщается возвратно-поступательное движение перпендикулярно оси заготовки и поступательное движение вдоль оси заготовки. При финишной обработке вместо резца может использоваться инструмент для выглаживания.

Схемы обработки, соответствующие рассмотренным случаям формообразования круговой винтовой поверхности, представлены на рисунке 3, а, б, в.

Множество возможных кинематических схем обработки круговой винтовой поверхности определяется распределением между инструментом и заготовкой составляющих их элементарных движений.

Для первого случая более простым в реализации является вариант, когда производящая окружность создается в результате согласованных возвратно-поступательного движения O_2 резца (см. рис. 3, а) перпендикулярно геометрической оси O_1 заготовки и вращения B'_1 последней вокруг этой оси. Параметры возвратно-поступательного движения резца таковы, что центр образующейся окружности в любой момент времени отстоит от геометрической оси заготовки на величину эксцентриситета профиля e .

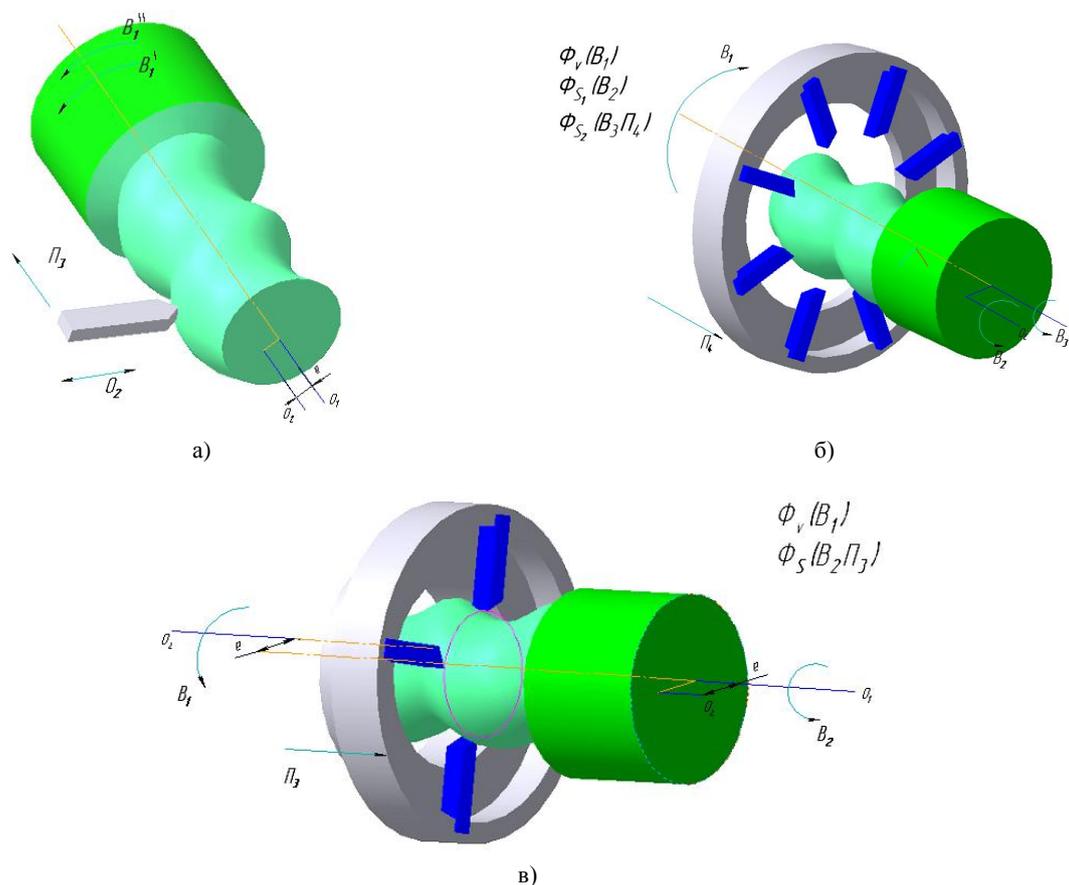


Рис. 3. Кинематические схемы обработки круговых винтовых поверхностей

Производящая окружность формируется сложным движением профилирования $\Phi_v(B'_1O_2)$, которое осуществляется со скоростью резания и образовано согласованными вращательным движением заготовки B'_1 вокруг своей геометрической оси и осциллирующим движением резца O_2 , кинематически связанным с движением B'_1 . Направляющая поверхности создается винтовым движением подачи $\Phi_s(\Pi_3B''_1)$, образованным поступательным движением Π_3 резца вдоль оси вращения заготовки и кинематически связанным с ним дополнительным вращением заготовки B''_1 вокруг этой оси. Соотношение между этими элементарными движениями таково, что за время перемещения инструмента относительно заготовки на шаг формируемой винтовой поверхности заготовка должна совершить один дополнительный оборот. Таким образом, при обработке по рассматриваемой схеме круговая винтовая поверхность формируется двумя сложными исполнительными движениями – движением резания $\Phi_v(B'_1O_2)$ и винтовым движением подачи $\Phi_s(\Pi_3B''_1)$. Достоинством этой схемы являются широкая универсальность, так как по ней возможна обработка винтовых поверхностей не только с круглым, но и некруглым профилем (каналовых поверхностей). Ее недостатком является относительно невысокая производительность из-за возвратно-поступательного движения инструмента и связанных с ним динамических нагрузок в станке.

Вторая схема обработки (см. рис. 3, б) основана на профилировании круговой винтовой поверхности вращательным движением расположенных по окружности производящих точек, диаметр которой равен диаметру производящей окружности этой поверхности, поэтому образующая (окружность) и направляющая (винтовая линия) формируются методом следа. В качестве режущего инструмента используется резцовая головка, которой для получения производящей окружности сообщается вращательное движение B_1 со скоростью резания (простое движение формообразования $\Phi_v(B_1)$) вокруг собственной

геометрической оси, смещенной на величину эксцентриситета e относительно геометрической оси заготовки. Относительное поступательное движение $П_3$ инструмента вдоль оси заготовки кинематически связано с вращением B_2 заготовки вокруг своей геометрической оси. Сочетанием движений B_2 и $П_3$ создается винтовое движение подачи $\Phi_s(П_3 B_2)$, необходимое для формирования второй производящей линии поверхности. Существенным преимуществом данной схемы по сравнению с первой являются лучшие условия обработки вследствие исключения возвратно-поступательного движения инструмента. Благодаря этому, а также участию в работе нескольких режущих лезвий повышается производительность обработки. Данная схема особенно эффективна при обработке длинных (нежестких) заготовок, так как действующие на заготовку со стороны противоположно расположенных режущих лезвий резцовой головки радиальные составляющие сил резания взаимно уравновешены. К недостаткам схемы следует отнести необходимость перенастройки резцовой головки при изменении диаметра поперечного сечения поверхности, а также возможность реализации только на специальном станке.

Третья кинематическая схема обработки (рис. 3, в) отличается от рассмотренных формированием производящей окружности круговой винтовой поверхности методом касания. Поэтому круговая винтовая поверхность образуется сочетанием методов касания и следа. В качестве режущего инструмента используется вихревая резцовая головка, которой сообщается вращательное движение B_1 вокруг собственной геометрической оси, смещенной на величину l относительно оси вращения заготовки, и поступательное движение $П_3$ вдоль этой оси. Метод обработки винтовых поверхностей вихревой резцовой головкой имеет высокую производительность и широко применяется при изготовлении червяков и ходовых винтов. Это позволяет рекомендовать его и для обработки роторов винтовых насосов. Производящая окружность в данном случае формируется двумя простыми исполнительными движениями: вращением B_1 резцовой головки со скоростью резания вокруг своей оси (движение $\Phi_v(B_1)$) и вращением B_2 заготовки со скоростью круговой подачи (движение Φ_{s1}) вокруг оси, смещенной относительно ее геометрической оси на величину эксцентриситета e . Формирование поверхности по длине осуществляется, как и в предыдущей схеме, винтовым движением подачи Φ_{s2} – согласованными поступательным движением резцовой головки вдоль оси заготовки $П_4$ и вращением заготовки B_3 вокруг своей геометрической оси. Данная схема отличается от предыдущей тем, что в обработке одновременно участвуют не все, а только часть режущих зубьев резцовой головки. При этом профилирование поверхности осуществляется не со скоростью резания, а со скоростью круговой подачи. Из-за присущего методу касания частичного формообразования производящей окружности ухудшается качество обработки, что выражается в образовании огранки. Из-за одностороннего взаимодействия режущих зубьев с заготовкой, к последней предъявляются более высокие требования в отношении жесткости. Достоинством данной схемы является возможность обработки различных по диаметру заготовок одним инструментом без его перенастройки.

Таким образом, из проведенного анализа схем формообразования круговых винтовых поверхностей следует, что для обработки роторов насосов в условиях единичного и ремонтного производства предпочтительна ввиду универсальности и простоты реализации первая схема. В условиях же серийного производства целесообразно применять вторую и третью схему.

Синтез кинематической структуры станков для обработки круговых винтовых поверхностей. Кинематика станка разрабатывается на основе его кинематической структурой, которая представляет совокупность кинематических групп и межгрупповых связей, необходимых для реализации принятых схем формообразования [5]. Она устанавливает функциональные связи исполнительных органов и механизмов станка при получении заданной поверхности в соответствии с реализуемой схемой формообразования и поэтому необходима для проектирования кинематики станка.

Построение кинематической структуры любого станка базируется на принципах, общих для станков с любыми кинематическими связями (механическими, электромеханическими, мехатронными, гидравлическими, комбинированными и др.) и системами управления. Основными из них являются следующие:

- исполнительное движение создается в станке соответствующей *кинематической группой* (простое движение – простой, а сложное – сложной кинематической группой);
- кинематическая группа содержит источник движения, внешнюю и внутреннюю связи, из которых внутренняя связь обеспечивает соответствующими органами настройки траекторию создаваемого движения, а внешняя связь – его скорость и направление, а также передачу энергии от источника движения во внутреннюю связь;
- кинематическая структура станка определяется структурой отдельных групп и способом их соединения между собой.

Исходными данными при разработке кинематической структуры станка являются: геометрия обрабатываемой поверхности (круговая винтовая); метод формообразования поверхности; применяемый инструмент.

Любая кинематическая группа включает в себя два качественно различных вида кинематической связи – внутреннюю и внешнюю. Под внутренней кинематической связью группы понимают совокупность кинематических звеньев и их соединений, обеспечивающих качественную характеристику движе-

ния, т.е. его траекторию. Под внешней кинематической связью группы понимают совокупность кинематических звеньев и их соединений, обеспечивающих количественные характеристики движения, т.е. его скорость, направление, путь и исходную точку. Кинематической структура станка для обработки круговых винтовых поверхностей должна обеспечивать формирование производящих линий поверхности (окружности и винтовой линии) и возможность настройки их геометрических параметров (диаметра, шага и направления винтовой поверхности).

Исходя из кинематики формообразования, исполнительными органами станка для обработки круговых винтовых поверхностей являются шпиндель с заготовкой, продольный и поперечный суппорты,

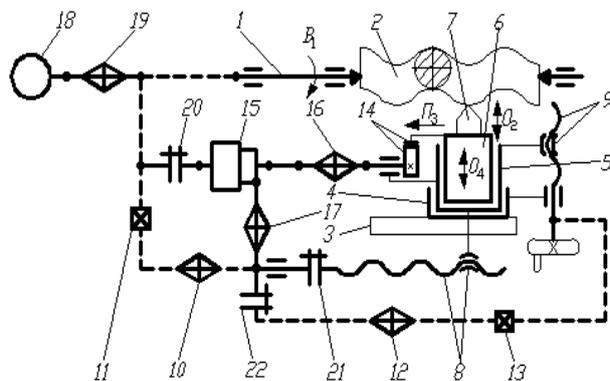


Рис. 4. Структурная схема станка для обработки круговых винтовых поверхностей

Продольный 4 и поперечный 5 суппорты снабжены тяговыми устройствами соответственно 8 и 9, служащие для перемещения этих суппортов. Тяговое устройство 8 связано со шпинделем 1 кинематической цепью, содержащей орган настройки 10 подачи продольного суппорта и реверсивный механизм 11 для настройки ее направления. Тяговые устройства 8 и 9 связаны между собой кинематической цепью, содержащей орган настройки 12 соотношения скоростей перемещения продольного и поперечного суппортов и реверсивный механизм 13 для настройки соотношения направлений этих движений при обработке конических винтовых поверхностей. На поперечном суппорте 5 смонтирован механизм 14 возвратно-поступательного движения каретки 6, который связан со шпинделем 1 кинематической цепью, содержащей суммирующий механизм 15 и орган настройки 16, служащий для задания соотношения между одним оборотом шпинделя и числом двойных ходов каретки 6 при обработке многозаходных винтовых поверхностей. Через суммирующий механизм 15 механизм 14 связан также с тяговым устройством 8, что позволяет сообщать каретке с инструментом 7 дополнительное движение, необходимое для получения на заготовке винтовой поверхности. Шаг этой поверхности настраивается органом 17. Для вращения шпинделя 1 и связанных с ним перемещений суппортов и каретки служит двигатель 18, который соединен со шпинделем 1 через орган 19 настройки частоты вращения шпинделя. Муфты 20, 21 и 22 предназначены для отключения соответственно механизма 14 или тяговых устройств 8 и 9, когда создаваемые ими движения не требуются для обработки заданной поверхности.

Кинематическая структура данного станка включает множество частных кинематических структур, обеспечивающих обработку различных винтовых поверхностей: цилиндрических и конических резьб, спиралей на торцах деталей, круговых и каналовых винтовых поверхностей.

Рассмотрим частную кинематическую структуру станка, соответствующую обработке круговых винтовых поверхностей. Данная структура содержит две сложные кинематические группы: группу движения профилирования $\Phi_v(B_1O_2)$ (образования производящей окружности) и группу движения $\Phi_s(\Pi_3O_4)$, обеспечивающего образование винтовой направляющей. Внутренняя связь группы движения профилирования выполнена в виде кинематической цепи, связывающей шпиндель 1 с кулачком механизма 14 через суммирующий механизм 15 и орган настройки 16. Внешняя связь этой группы соединяет двигатель 18 с внутренней связью через орган настройки 19 скорости исполнительного движения. Внутренняя связь второй кинематической группы соединяет тяговое устройство 8 с кулачком механизма 14 через орган настройки 17, суммирующий механизм 15 и орган настройки 16. Внешняя связь этой группы соединяет двигатель 18 с ее внутренней связью через органы настройки 19, 11 и 10.

Станок настраивается в соответствии с режимом резания и параметрами обрабатываемой круговой винтовой поверхности (диаметр ее поперечного сечения, эксцентриситет профиля, шаг и направление винтовой поверхности). При настройке станка диаметр поперечного сечения (производящей окружности) устанавливается перемещением поперечного суппорта 5 поперек станины, эксцентриситет профиля

поэтому его кинематическая структура должна содержать две сложные кинематические группы: группу движения профилирования и группу винтового движения. Такую кинематическую структуру имеет станок [8] для обработки круговых и других типов винтовых поверхностей, структурная схема которого представлена на рисунке 4. Станок содержит шпиндель 1, несущий обрабатываемую заготовку 2, станину 3, на которой с возможностью перемещения вдоль нее установлен продольный суппорт 4, несущий поперечный суппорт 5 и установленную на нем с возможностью перемещения поперек станины каретку 6 с закрепленным на ней резцом 7. После обработки резцом может использоваться также инструмент для поверхностно-пластического деформирования.

обеспечивается установкой в механизме 14 возвратно-поступательного движения каретки 6 сменного кулачка соответствующей формы; шаг получаемой винтовой поверхности настраивается органом 17, а ее направление (левое или правое) – реверсивным механизмом 11.

Элементы режима резания – скорость резания (частота вращения шпинделя с заготовкой) и подача продольного суппорта настраиваются соответственно органами 19 и 10.

При обработке круговой винтовой поверхности станок работает следующим образом. Шпиндель 1 с заготовкой 2 получают от двигателя 18 вращение B_1 с частотой, настроенной органом 19, а каретка 6 с инструментом 7 – возвратно-поступательное (осциллирующее) движение O_2 , согласованное с вращением шпинделя. В результате осуществления этих движений на заготовке 2 инструментом 7 формируется заданный профиль поперечного сечения круговой винтовой поверхности – окружность определенного радиуса.

Одновременно с указанными движениями получает прямолинейное перемещение $П_3$ продольный суппорт 4, благодаря чему осуществляется обработка поверхности по длине. Вследствие того, что тяговое устройство 8 через суммирующий механизм 15 связано с механизмом 14 возвратно-поступательного движения, каретка 6 с инструментом 7 получают дополнительное возвратно-поступательное движение O_4 , вследствие чего инструментом формируется винтовая поверхность с круговым профилем, требуемый шаг которой обеспечивается органом настройки 17, а ее направление – реверсивным механизмом 11.

Для обработки круговой винтовой поверхности резцовой головкой (см. рис. 3, б) кинематика станка должна создавать простое движение резания Φ_V (вращение резцовой головки) и винтовое движение подачи Φ_S . Исполнительными органами станка в данном случае являются шпиндель с заготовкой, продольный и поперечный суппорты и установленная на поперечном суппорте резцовая головка.

Исходя из изложенных выше положений, разработана структурная схема станка (рис. 5), которая в соответствии со схемой формообразования обеспечивает следующие исполнительные движения [8]: вращение резцовой головки B_1 ; вращение заготовки B_2 ; поступательное перемещение резцовой головки $П_3$; установочное перемещение резцовой головки $П_4$.

Учитывая, что движения B_2 и $П_3$ кинематически связаны между собой в соответствии с шагом круговой поверхности, они образуют винтовое исполнительное движение $\Phi_S(B_2 П_3)$. Указанные движения создаются кинематическими группами главного движения $\Phi_V(B_1)$, движения подачи $\Phi_S(B_2 П_3)$ и установочного движения $Уст(П_4)$ [9]. Для задания параметров движений формообразования кинематические группы содержат соответствующие органы настройки: i_{v_1} (настройка частоты вращения заготовки – скорости движения $\Phi_V(B_1)$); i_{v_2} (настройка скорости движения $\Phi_S(B_2 П_3)$) и i_x (настройка шага формируемой круговой винтовой поверхности – траектории и направления движения $\Phi_S(B_2 П_3)$). Внутреннюю связь первой кинематической группы составляют направляющие, в которых вращается резцовая головка. Внешняя связь – соединение двигателя M_1 через орган настройки i_{v_1} с приводом резцовой головки. Внутренняя связь второй кинематической группы соединяет тяговое устройство 12 со шпинделем 9 через орган настройки i_x . Внешняя связь этой группы соединяет двигатель M_2 с ее внутренней связью через орган настройки i_{v_2} .

Представленные структурные схемы служат основой проектирования станков для обработки круговых винтовых поверхностей как при создании нового, так и при модернизации существующего оборудования.

Реализация технологий формообразования круговых винтовых поверхностей. Рассмотренные выше методы формообразования круговых винтовых поверхностей при обработке роторов винтовых насосов

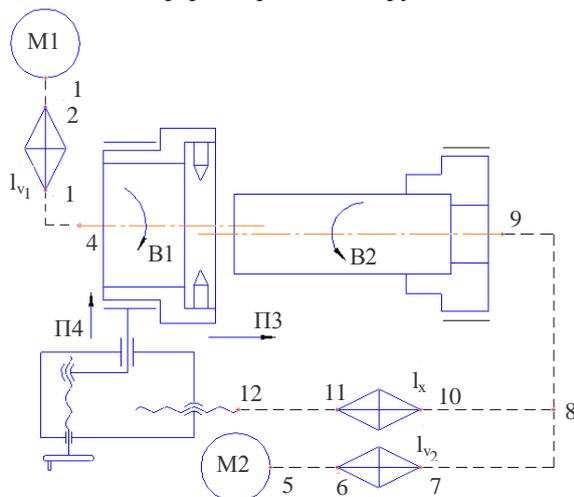


Рис. 5. Структурная схема станка для обработки круговых винтовых поверхностей резцовой головкой

могут быть реализованы как на специально созданных, так и на модернизированных существующих станках иного технологического назначения.

Так, метод обработки вращающейся резцовой головкой может быть осуществлен при модернизации выпускаемых отечественной промышленностью станков, имеющих кинематическую структуру, близкую к представленной на рисунке 5. К ним относятся, в частности, широкоуниверсальные зубошлифцифрезерные станки производства Витебского станкостроительного завода «Вистан», кинематика которых обеспечивает формообразование винтовых поверхностей. В этом случае модернизация станка заключается в его оснащении инструментальным блоком, оснащенным резцовой головкой и приводом ее вращения.

Технически просто решается задача реализации схемы обработки круговых винтовых поверхностей осциллирующим инструментом на существующем станочном оборудовании иного технологического

назначения, в частности, на токарно-затыловочном станке модели 1Б811, одна из частных кинематических структур которого аналогична структуре, представленной на рисунке 4. Конструкция этого станка обеспечивает возможность настройки всех параметров круговой винтовой поверхности, что позволяет обрабатывать на нем широкую номенклатуру роторов винтовых насосов.

Модернизация токарно-затыловочного станка заключается в соответствующем исполнении механизма возвратно-поступательного движения поперечного суппорта для кинематического формирования производящей окружности винтовой круговой поверхности. Модернизация станка позволила освоить по заказу предприятий производство роторов винтовых насосов и литейной оснастки для изготовления их статоров.

Таким образом, представленные разработки по реализации принятой схемы формообразования круговых винтовых поверхностей являются основой схематехнического проектирования станков для обработки круговых винтовых поверхностей как при создании нового, так и при модернизации существующего оборудования.

Заключение. Круговые винтовые поверхности применительно к обработке резанием можно рассматривать как кинематические с производящими линиями постоянной формы. При формообразовании круговой винтовой поверхности методом двойного следа за ее образующую целесообразно принять окружность, а за направляющую – винтовую линию. Для практической реализации предпочтительно формирование производящей окружности или простым вращательным движением резцовой головки, или двухэлементарным исполнительным движением, образованным вращением заготовки и возвратно-поступательным движением инструмента. Обе схемы могут быть осуществлены как на специальных, так и на модернизированных станках иного технологического назначения. Разработанные кинематические структуры являются основой проектирования специальных станков для обработки круговых винтовых поверхностей, а также выбора модернизируемых станков. Разработанная и реализованная технология формообразования позволила решить задачу производства роторов винтовых насосов взамен поставляемых по импорту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дружинский, И.А. Сложные поверхности: математическое описание и технологическое обеспечение: справ. / И.А. Дружинский. – Л.: Машиностроение, 1985. – 263 с.
2. Данилов, В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 264 с.
3. Люкшин, В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов / В.С. Люкшин. – М.: Машиностроение, 1968.
4. Коновалов, Е.Г. Основы новых способов металлообработки / Е.Г. Коновалов. – Минск: Изд-во АН БССР, 1961. – 297 с.
5. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
6. Данилов, В.А. Оптимизация схем формообразования круговых винтовых поверхностей резанием / В.А. Данилов, А.А. Чепурной // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – № 12. – 2005. – С. 132 – 135.
7. Ситько, Ю.В. Анализ схем формообразования круговых винтовых поверхностей / Ю.В. Ситько // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. Вып. 31. Промышленность. – 2008. – С. 87 – 90.
8. Станок для обработки винтовых поверхностей: пат. 4118 ВУ. МПК В23В 1/00, В23G 1/00 / В.А. Данилов, А.А. Чепурной; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20070465; опубл. 2007.10.02 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007.
9. Ситько, Ю.В. Синтез кинематики станка для обработки круговых винтовых поверхностей / Ю.В. Ситько // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. Вып. 31. Промышленность. – 2008. – С. 90 – 93.

Поступила 20.05.2009