

Данилов В. А.<sup>1</sup>, Чепурной А. А.<sup>2</sup>**ФОРМООБРАЗУЮЩАЯ ОБРАБОТКА КРУГОВЫХ ВИНТОВЫХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ РОТОРОВ ОДНОВИНТОВЫХ НАСОСОВ**

1. Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь

2. Полоцкий государственный университет,  
Новополоцк, Беларусь

*Исходя из геометрии круговой винтовой поверхности и ее представления как кинематической, формируемой при относительном перемещении окружности и винтовой линии, обоснованы метод формообразования и схема обработки такой поверхности применительно к изготовлению роторов одновинтовых насосов. Рассмотрена кинематическая структура станка для их обработки, показано ее соответствие кинематической структуре токарно-затыловочного станка. На этой основе разработана и реализована импортозамещающая технологии обработки роторов одновинтовых насосов резанием и последующим поверхностным пластическим деформированием.*

**Введение.** Круговые винтовые поверхности (КВП) являются рабочими поверхностями роторов одновинтовых насосов (рис. 1) различного технологического оборудования от нефтегазовой отрасли до пищевой промышленности [1]. Следует отметить, что отечественная промышленность не производит станки для обработки КВП, поэтому детали эксплуатируемого в стране импортного оборудования с такими поверхностями обычно приобретаются за рубежом.



Рис. 1. Ротор винтового насоса с круговой винтовой поверхностью

В этой связи актуально освоение производства винтовых роторов, что связано с разработкой и реализацией технологии формообразования КВП. Под технологией формообразования в соответствии с современными представлениями понимается совокупность метода формообразования поверхности, схемы ее обработки и средств реализации (станок, инструмент, приспособление).

Для обеспечения потребности промышленности в роторах винтовых насосов при отсутствии специальных станков экономически целесообразно создание технологий формообразования КВП на универсальных станках за счет расширения их технологических возможностей. Эта актуальная научно-техническая задача решена на основе анализа геометрии КВП, обоснования метода ее формообразования, разработки схемы обработки и средств ее реализации, отработки технологии обработки роторов на универсальном оборудовании. При этом учтено современное направление в технологии машиностроения, предусматривающее комплексную обработку рабочих поверхностей деталей резанием и последующим поверхностным пластическим деформированием.

**Анализ геометрии и формирование КВП при механической обработке.** Поперечное сечение КВП  $S$  (рис. 2) с шагом  $T$ , вписанной в круглый цилиндр диаметром  $D$ ,

представляет окружность диаметром  $d$ , центр которой смещен от оси КВП на расстояние  $e$  – эксцентриситет профиля [2]. При таком представлении КВП можно рассматривать как кинематическую [3], образуемую при перемещении производящей окружности  $S$  (образующей) по винтовой линии  $L$  (направляющей) с шагом  $T$ . Конструкция станка для обработки КВП должна обеспечивать получение производящих линий поверхности (окружности и винтовой линии) и возможность настройки указанных параметров.

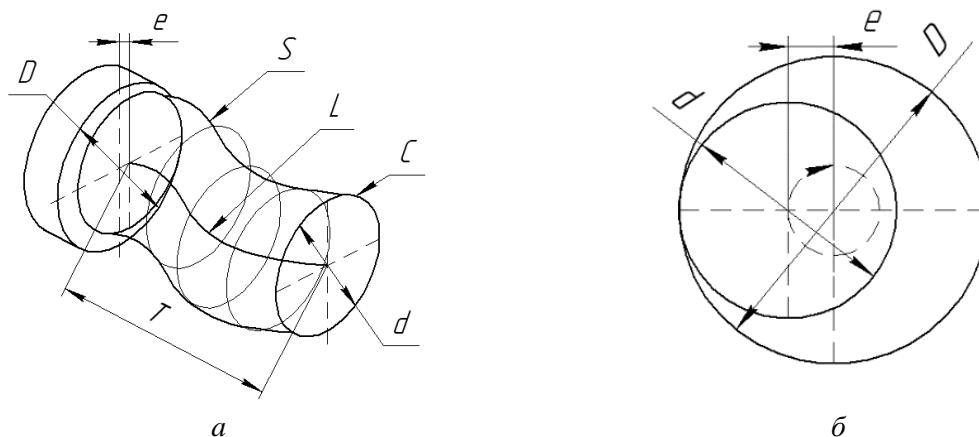


Рис. 2. Геометрия круговой винтовой поверхности ротора насоса:  
 $a$  – общий вид;  $b$  – поперечное сечение

Основой схемы обработки служит метод формообразования поверхности, как возможное сочетание методов образования ее производящих линий (образующей и направляющей): следа, касания, копирования, обката [4], которые различаются формой производящего элемента инструмента (точка или линия) и кинематикой формообразования. Из-за переменной во всех направлениях формы КВП, необходимости обеспечения высокой производительности и простоты реализации предпочтителен метод ее формообразования, основанный на воспроизведении обеих производящих линий методом следа, т. е. точкой, что возможно точением при перемещении этой точки (вершины резца) по определенной траектории.

Таким образом, в рассматриваемой задаче КВП формируется методом двойного следа, поэтому материальным носителем формы обеих производящих линий является механика станка, осуществляющая кинематическое формирование КВП в поперечном и продольном направлениях, что предопределяет его кинематическую структуру. В соответствии с временной классификацией методов формообразования в машиностроении [3] метод двойного следа относится к классу непрерывных методов формирования производящих линий (Н-Н), поэтому его производительность выше, чем прерывистого метода (П-П), на котором основана известная технология обработки винтовых поверхностей роторов фрезерованием на станке с ЧПУ [5].

**Обоснование схемы обработки КВП.** Поскольку центр производящей окружности  $S$  смещен от оси КВП на величину эксцентриситета  $e$  (рис. 2,  $b$ ), то при обработке точением относительное перемещение вершины резца создается сочетанием, как минимум, двух элементарных движений, одно из которых, например, вращательное  $B$ , а другое осциллирующее  $O$  (возвратно-поступательное) или качательное  $K$ , которые создают движение формирования окружности со скоростью резания, соответственно,  $\Phi V(B1O2)$  или  $\Phi V(B1K2)$ .

Необходимое для формирования КВП перемещение  $U_3$  образуемой окружности по винтовой линии заданного шага может осуществляться за счет дополнительного вращения  $B_1''$  заготовки (рис. 3,  $a$ ) вокруг своей геометрической оси, согласованного с поступа-

тельным движением  $\Pi_3$  резца вдоль заготовки. Таким образом, в этом случае КВП формируется двумя сложными исполнительными движениями – движением профилирования со скоростью резания  $\Phi_V(B_1 O_2)$  и винтовым движением подачи  $\Phi_S(\Pi_3 B_1'')$ . Недостаток такой схемы обработки – сложность сообщения заготовке дополнительного вращения  $B_1''$ .

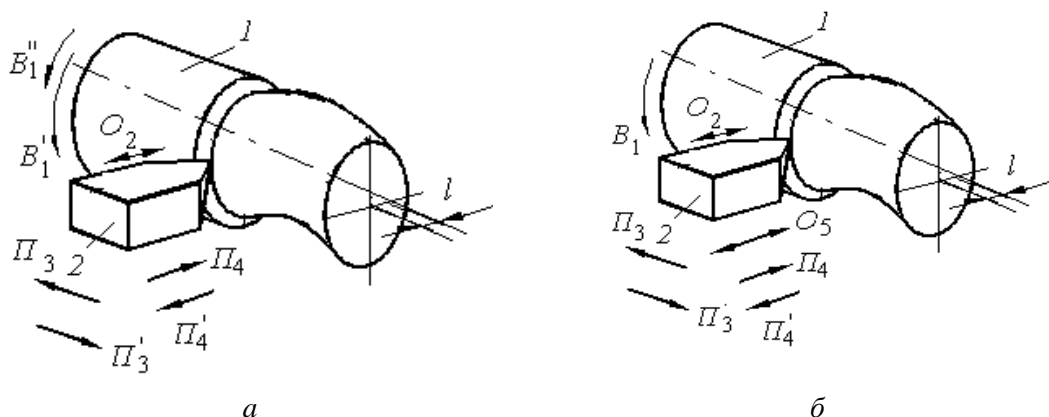


Рис. 3. Схемы точения круговой винтовой поверхности при сообщении дополнительного движения заготовке (а) или резцу (б)

Так как вращение заготовки и возвратно-поступательное движение резца взаимосвязаны, то вместо дополнительного вращения заготовки  $B_1''$  резцу может сообщаться дополнительное возвратно-поступательное движение  $O_5$  (рис. 3, б). В этом случае поверхность формируется движениями  $\Phi_V(B_1 O_2)$  и  $\Phi_S(\Pi_3 O_5)$ . Параметры возвратно-поступательного движения резца таковы, что центр формируемой окружности в любой момент времени отстоит от геометрической оси КВП на величину эксцентриситета профиля  $e$ . Эта схема обработки, как более простая, принята для реализации разработанной технологии формообразования КВП. Кроме указанных формообразующих движений для обработки КВП необходимы установочные и вспомогательные движения. Установочное движение  $Уст(\Pi_4)$  (см. рис. 3, б) служит для настройки глубины резания. Обратное ему вспомогательное движение  $Всп_1(\Pi_5')$ , а также вспомогательное движение  $Всп_2(\Pi_3')$  необходимы для возвращения резца в исходное положение.

**Обоснование кинематической структуры станка для обработки круговых винтовых поверхностей.** Кинематическая структура станка должна обеспечивать возможность создания всех движений и настройки их параметров. При этом учитывается, что движение  $\Phi_V(B_1 O_2)$  сложное с замкнутой траекторией, поэтому должно настраиваться по трем параметрам – траектории, скорости и направлению, а движение  $\Phi_S(\Pi_3 O_5)$  сложное с незамкнутой траекторией настраивается по пяти параметрам – траектории, скорости, направлению, исходной точке и длине пути. Длина пути и исходное положение этого и других движений на универсальном станке с ручным управлением обеспечиваются станочником.

Кинематическая структура станка в общем случае устанавливает необходимые функциональные связи между его исполнительными органами в соответствии с реализуемой схемой обработки и обеспечивает возможность настройки параметров всех исполнительных движений [4]. Поэтому кинематической структура станка для обработки КВП должна создавать движения, необходимые для формирования 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, поэтому его кинематическая структура содержит две сложные кинематические группы: группу движения профилирования и группу винтового движения. Такую кинематическую структуру имеет станок [6] для обработки круговых и других типов винтовых поверхностей, структурная схема которого представлена на рис. 4.

Станок содержит шпиндель 1, несущий 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 обработанной поверхности.

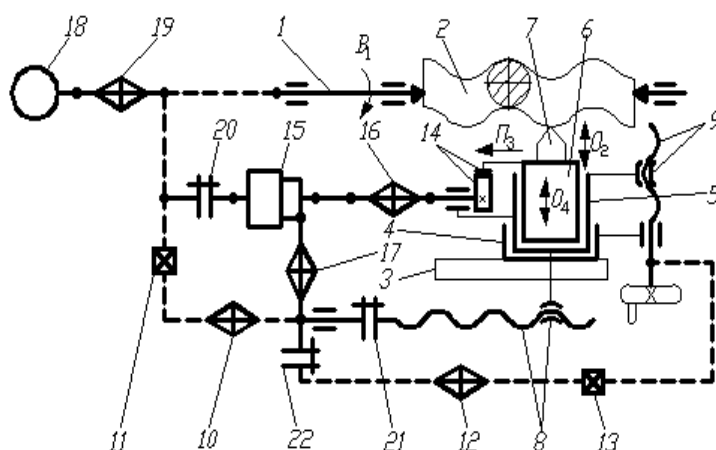


Рис. 4. Структурная схема станка для обработки круговых винтовых поверхностей

Продольный 4 и поперечный 5 суппорты снабжены тяговыми устройствами, соответственно 8 и 9. Устройство 8 связано со шпинделем 1 кинематической цепью, содержащей орган настройки 10 скорости 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 20-22 предназначены для отключения соответственно механизма 14 или тяговых устройств 8 и 9, когда создаваемые ими движения не требуются для обработки заданной поверхности.

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  $\Phi_s(P_3O_4)$ , 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 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 КВП 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 профиль поперечного сечения круговой винтовой поверхности – окружность определенного радиуса.

Одновременно с указанными движениями получает прямолинейное перемещение  $P_3$  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  $11$ .

Аналогичную кинематическую структуру имеют универсальные токарно-затыловочные станки при затыловании червячных фрез и метчиков. Поэтому рассматриваемая схема обработки КВП (см. рис. 3, б) может быть реализована на этих станках при соответствующем исполнении механизма возвратно-поступательного движения поперечного суппорта, что исключает необходимость в создании или приобретении соответствующего станка для обработки винтовых роторов. Поскольку указанное движение суппорта осуществляется кулачковым механизмом, то изменение его конструкции связано с заменой кулачка затылования на кулачок формирования окружности, эксцентрично расположенной относительно оси вращения заготовки.

**Реализация схемы обработки круговой винтовой поверхности.** Схема обработки по рис. 3, б реализована на токарно-затыловочном станке модели 1Б811 (рис. 5), конструкция которого обеспечивает возможность настройки всех параметров круговой вин-

товой поверхности, что позволяет обрабатывать на нем широкую номенклатуру винтовых роторов с размерами: диаметр – до 200 мм; длина – до 1000 мм; эксцентриситет профиля – до 15 мм.



Рис. 5. Фото модернизированного токарно-затыловочного станка модели 1B811 с партией обработанных на нем винтовых роторов

Для обработки круговой винтовой поверхности в станке настраивают следующие кинематические цепи:

- цепь вращения шпинделя с заготовкой – устанавливают переключением коробки скоростей частоту его вращения в соответствии с заданной скоростью резания;
- цепь деления, связывающую шпиндель с поперечным суппортом, с помощью гитары деления, так чтобы передаточное отношение этой цепи было равно единице;
- цепь подач (перемещения продольного суппорта) – устанавливают с помощью коробки подач заданную величину подачи;
- цепь дифференциала (винторезную цепь) – настраивают гитару дифференциала (резьб) на шаг круговой винтовой поверхности.

Из-за того, что центр формируемой окружности (поперечного сечения винтовой поверхности) смещен относительно оси вращения заготовки на расстояние, равное эксцентриситету профиля, в процессе обработки непрерывно изменяются передний и задний рабочие углы режущего лезвия. Изменение этих углов необходимо учитывать при проектировании резцов.

Разработанная технология обработки роторов винтовых насосов на токарно-затыловочном станке предусматривает выполнение после формирования КВП резанием ее окончательной обработки поверхностным пластическим деформированием – выглаживанием инструментом, который устанавливается вместо резца. Это позволяет уменьшить шероховатость обработанной поверхности и повысить твердость поверхностного слоя, что важно для обеспечения износостойкости и долговечности ротора.

### **Выводы.**

1. Представление КВП как кинематической, формируемой относительным перемещением производящей окружности и винтовой линии, позволило обосновать простые в реализации метод формообразования и схему обработки такой поверхности.

2. Предложенный метод формообразования КВП обеспечивает возможность обработки роторов одновинтовых насосов резанием и поверхностным пластическим деформированием на универсальном токарно-затыловочном станке, что исключает необходимость создания специального станка.

3. Реализация результатов исследования позволила освоить производство роторов винтовых насосов и отказаться от их закупки за рубежом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Балденко, Д. Ф. Одновинтовые гидравлические машины / Д. Ф. Балденко, Ф. Д. Балденко, А. Н. Гноевых. Т. 1. – М.: ООО ИРЦ Газпром», 2005. – 341 с.

2. Люкшин, В. С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов / В. С. Люкшин. – М.: Машиностроение, 1968. – 372 с.

3. Коновалов, Е. Г. Основы новых способов металлообработки / Е. Г. Коновалов. – Минск: Изд-во АН БССР, 1961. – 257 с.

4. Федотенок, А. А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А. А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.

5. Гончаров А. А. Технологическое обеспечение качества формообразования циклоидальных винтовых поверхностей при обработке непрофилированным инструментом на многоцелевых станках: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / А. А. Гончаров; МВТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 2020. – 16 с.

6. Станок для обработки винтовых поверхностей: Патент РБ на полезную модель № 4118 / В. А. Данилов, А. А. Чепурной; заявитель Учреждение образования Полоцкий государственный университет. – Заявка № u 20070465 от 25.06.2007.

*Поступила 14.05.2022*

УДК 621.793

**Девойно О. Г., Косякова И. М., Кардаполова М. А.**

## **О МИКРОСТРУКТУРЕ, МИКРОТВЕРДОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ**

### **ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СЕРОГО ЧУГУНА ПОСЛЕ**

### **ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ**

*Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь*

*В статье описана эффективность лазерной закалки серого чугуна СЧ20. Основные свойства поверхностного слоя серого чугуна при лазерном упрочнении, включая микроструктуру, микротвердость, трибологические свойства и износостойкость, были сопоставлены со свойствами чугуна в исходном состоянии. Установлено, что лазерное упрочнение при правильном выборе скорости и диаметра лазерного луча обеспечивает пяти-десятикратное повышение износостойкости серого чугуна по сравнению с исходным состоянием. Соответствующий выбор значений скорости и диаметра лазерного излучения обеспечивает стабильные и низкие коэффициенты трения и очень значительное повышение износостойкости по сравнению со значениями, достигнутыми для чугуна в исходном состоянии.*

**Введение.** Чугун – один из наиболее распространенных конструкционных материалов, используемый в первую очередь в серийном и массовом производстве. В зависимости от назначения могут использоваться белые, серые, ковкие или высокопрочные чу-