



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.9.04

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-81-91

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Альбов М.А., Акулиничев П.Д., Гончаров А.А.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В статье проводится анализ существующих методов изготовления внутренних циклоидальных винтовых отверстий. Задача является актуальной, так как внутренние циклоидальные винтовые поверхности встречаются в деталях объёмных одновинтовых машин, которые все чаще применяются в различных отраслях промышленности. Область применения одновинтовых машин зависит от типа применяемой винтовой пары, содержащей металлический ротор и полимерную обойму. Именно свойства материала, а значит, и способ получения винтовой обоймы определяет эксплуатационные характеристики одновинтовой машины, поэтому данные о технологических возможностях тех или иных методов получения циклоидальных винтовых отверстий могут быть полезны не только технологам, но и конструкторам, занимающимся разработкой новых, прогрессивных машин. В качестве материалов для изучения методов формообразования внутренних циклоидальных винтовых поверхностей послужили открытые информационные источники, а также опыт производителей одновинтовых машин. Методы исследования, применяющиеся в статье, – сбор, изучение и сравнительный анализ информации. Среди разнообразия методов получения внутренних сложнопрофильных поверхностей были представлены только те, что, по мнению автора, могут быть промышленно применены для формообразования внутренних циклоидальных винтовых поверхностей. Были проанализированы технологические возможности различных методов и сведены в таблицу применимости того или иного метода. Исследование показало, что существующие подходы изготовления внутренних циклоидальных винтовых поверхностей не перекрывают всех потребностей современной промышленности к обеспечению качества и габаритных характеристик существующих одновинтовых машин. В частности, на данный момент не существует метода формообразования высокоточной мелко-размерной внутренней циклоидальной винтовой поверхности из доступных химически стойких материалов. В статье приводятся предпосылки, способствующие разработке уникального метода, который позволит изготавливать поверхности такого рода с применением современных и доступных химически стойких материалов.

Ключевые слова: циклоидальная винтовая поверхность, формообразование, технология изготовления, точность, одновинтовой насос, героторная пара, технологические возможности

© Альбов М.А., Акулиничев П.Д., Гончаров А.А., 2024

Для цитирования

Альбов М.А., Акулиничев П.Д., Гончаров А.А. Современные методы получения внутренних циклоидальных винтовых поверхностей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 81-91. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-81-91>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

MODERN METHODS FOR PRODUCING INTERNAL CYCLOIDAL HELICAL SURFACES

Albov M.A., Akulinichev P.D., Goncharov A.A.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. The article analyzes the existing methods for producing internal cycloidal screw holes. The task is currently relevant, since internal cycloidal screw surfaces are found in parts of volumetric single-screw machines, which are increasingly used in various industries. The scope of application of single-screw machines depends on the type of screw pair used, containing a metal rotor and a polymer cage. It is the properties of the material, and, consequently, the method of producing a screw cage that determines the operational characteristics of a single-screw machine, therefore, data on the technological capabilities of certain methods for producing cycloidal screw holes can be useful not only to technologists, but also to designers involved in the development of new, progressive machines. Open information sources, as well as the experience of single-screw machine manufacturers, served as materials for studying the methods of shaping internal cycloidal screw surfaces. The research methods used in the article are a collection, study and a comparative analysis of information. The variety of methods for producing internal composite surfaces included only those that could be industrially used for shaping internal cycloidal screw surfaces, according to the author's opinion. The authors analyzed technological capabilities of various methods and summarized in a table applicability of a particular method. The study showed that the existing approaches to producing internal cycloidal screw surfaces did not cover all the needs of the modern industry to ensure the quality and overall dimension characteristics of existing single-screw machines. In particular, now there is no method for forming a high-precision small-sized inner cycloidal screw surface from available chemically resistant materials. The article presents the prerequisites for developing a unique method to produce surfaces of this kind using modern and affordable chemically resistant materials.

Keywords: cycloidal screw surface, shaping, manufacturing technology, accuracy, single-screw pump, gerotor pair, technological capabilities.

For citation

Albov M.A., Akulinichev P.D., Goncharov A.A. Modern Methods for Producing Internal Cycloidal Helical Surfaces. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 81-91. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-81-91>

Введение

В современной промышленности существуют и активно развиваются объёмные одновинтовые машины [1-3]. Главным рабочим органом таких устройств является героторная или одновинтовая пара, состоящая из сложнопрофильного металлического ротора и, как правило, эластомерной обоймы с внутренней циклоидальной винтовой поверхностью (ЦВП) (рис. 1).

Область применения одновинтовых насосов постоянно расширяется, вследствие чего номенклатура материалов для изготовления обойм также увеличивается. Так, для применений в пищевой промышленности обоймы должны обладать инертностью по отношению к перекачиваемым веществам, поэтому в

этой отрасли применяются бессажевые бутадиен-нитрильный каучук (NBR) или этиленпропилендиеновый каучук (EPDM). В сфере строительства при применении героторных пар в одновинтовых дренажных насосах и штукатурных станциях наиболее критичным фактором при перекачивании рабочих жидкостей является наличие в них абразивных частиц, поэтому в данной сфере применяются полиуретаны (PU), обладающие высокой абразивной износостойкостью. В одновинтовых насосах для нефтедобывающей промышленности в обоймах применяют фторкаучук (ФКМ), который химически не разрушается при длительном контакте с нефтепродуктами.



Рис. 1. Одновинтовая пара: 1 – ротор; 2 – корпус обоймы; 3 – эластомерный слой обоймы; 4 – внутренняя циклоидальная винтовая поверхность

Fig. 1. Gerotor pair: 1 is a rotor; 2 is a cage body; 3 is an elastomer layer of the cage; 4 is an internal cycloidal helical surface

В некоторых отраслях промышленности, таких как фармацевтика и химическая отрасль, предъявляются уникальные требования к химической стойкости рабочих органов, соприкасающихся с перекачиваемой средой [4, 5]. В этой сфере для изготовления обойм применяется перфторированный каучук (ФФКМ). Однако стоимость этого материала в 150 раз превышает стоимость традиционно применяющегося фторкаучука (ФКМ), что оказывает значительное влияние на стоимость конечного изделия.

Конструкция обоймы одновинтового насоса, как правило, состоит из двух частей – это жёсткий корпус обоймы и упругая внутренняя часть с отверстием в виде ЦВП. Зачастую корпус одновинтовой обоймы изготавливают цилиндрическим, но для обеспечения высоких величин напора и равномерного натяга в одновинтовой паре применяются корпуса обойм, повторяющие внутреннюю ЦВП эластомерного слоя обоймы [6]. Например, немецкая компания «Knauf PFT» делает корпус винтовой обоймы с внутренней ЦВП (рис. 2), что при больших габаритах обоймы даёт экономию материала по сравнению с традиционной цилиндрической формой корпуса.



Рис. 2. Сложнопрофильный металлический корпус обоймы штукатурной станции

Fig. 2. Geometrically complex metal casing of the plaster station cage

Таким образом, на сегодняшний день существует множество методов изготовления таких изделий, но развитие насосных систем вызывает потребность в новых методах формообразования внутренней ЦВП для эластомерного слоя из современных материалов с повышенной химической стойкостью и абразивостойкостью для расширения области применения данного типа оборудования и снижения его конечной стоимости для потребителя. А также существует потребность в изготовлении внутренней ЦВП в конструкционных материалах, таких как металлы и пластики. Поэтому будут рассмотрены методы получения внутренних ЦВП не только в эластомерах, но и в жестких материалах, таких как металлы и пластики.

Материалы и методы исследования

В качестве материалов для изучения методов формообразования внутренних циклоидальных винтовых поверхностей послужили открытые информационные источники, а также опыт производителей одновинтовых машин. Методы исследования, применяющиеся в статье, – сбор, изучение и сравнительный анализ информации.

Полученные результаты и их обсуждение

Рассмотрим существующие в настоящий момент методы формирования внутренней циклоидальной винтовой поверхности.

Наиболее простым и универсальным методом получения внутренней ЦВП является **литьё в форму** [7]. Метод литья применим для изготовления обойм одновинтовых машин из жидкотекучих материалов, таких как полиуретаны или композиты на их основе. При таком методе в качестве опалубки выступает металлический корпус обоймы 1 (рис. 3), в который устанавливается литьевой стержень 2, формирующий внутреннюю циклоидальную винтовую поверхность за счет переноса профиля винтового стержня на поверхность получаемой детали. Благодаря этому можно добиться высокого качества поверхностного слоя и точности геометрии порядка 0,04-0,2 мм, где точность определяется усадкой литейного материала и точностью изготовления литейного стержня. Данный метод широко распространен при изготовлении обойм одновинтовых машин, применяемых в строительстве. Получаемые габариты изделий ограничены размерами литейного стержня с ЦВП, который в виду геометрических соотношений не может быть обработан при очень малом размере. Производители одновинтовых машин изготавливают данным методом обоймы со следующими размерами: минимальная высота обоймы 100 мм, диаметр 10 мм, а максимальные габариты ограничиваются целесообразной точностью формы, зависящей от усадки материала при литье.

Также с помощью различных методов литья, таких как литьё по выплавляемым моделям, литьё в песчано-глинистые формы, можно изготавливать корпуса обойм из литейных металлов и пластиков. Сложность изготовления в данном случае представляет литейный стержень с ЦВП, который должен быть разрушаемый, так как извлечь его из твердого тела не представляется возможным.

Другим наиболее распространенным методом получения внутренней ЦВП эластомерного слоя обоймы является **прессование в форму** [8] (рис. 4). Широкое распространение прессование получило благодаря применению доступного эластомерного материала – каучука, имеющего высокую химическую стойкость ко многим материалам. Метод заключается в запрессовывании пуансоном 7 подогретого каучука 5 в полость корпуса обоймы 1, где винтовой стержень с ЦВП 2 формирует профиль внутренней сложнопрофильной

поверхности. Далее при определенной температуре проводят вулканизацию каучука и последующее выбивание винтового стержня с ЦВП. Этот способ схож с литьём, но в отличие от него применяется для более вязких материалов, поэтому габариты получаемых изделий и точность формы, так же как и при литье, ограничены литейным стержнем и усадкой материала, которая для каучуков зачастую выше, чем для заливочных компаундов и составляет порядка 0,1-0,3 мм.

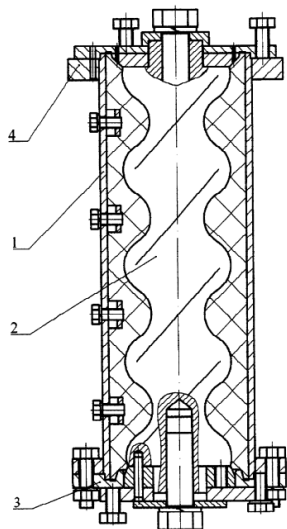


Рис. 3. Общий вид литейной формы: 1 – корпус; 2 – литейный стержень; 3 – нижний фланец с выпорами; 4 – верхний фланец
 Fig. 3. General view of the casting mold: 1 is a body; 2 is a casting core; 3 is a lower flange with projections; 4 is an upper flange

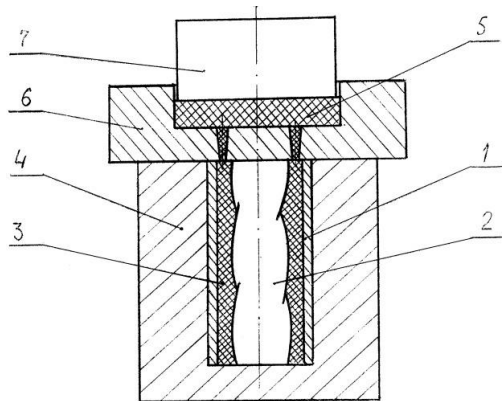


Рис. 4. Общий вид формы для прессования: 1 – корпус обоймы; 2 – винтовой стержень с ЦВП; 3 – эластомерный слой; 4 – пресс-форма; 5 – эластомер; 6 – загрузочная камера; 7 – пуансон
 Fig. 4. General view of the pressing mold: 1 is a cage body; 2 is a screw rod with the cycloidal helical surface; 3 is an elastomeric layer; 4 is a mold; 5 is elastomer; 6 is a loading chamber; 7 is a punch

Как методы литья, так и методы прессования требуют изготовления сложнопрофильного стержня с циклоидальной винтовой поверхностью, относящейся к тому же классу поверхностей, что и ротор одновинтовых машин. Такие наружные сложнопрофильные детали в основном изготавливают из металлов прогрессивными лезвийными методами [9]. Для достижения высокого качества поверхностного слоя применяются методы галтовки или поверхностного пластического деформирования [10, 11].

К перспективным методам, не получившим широкого распространения, можно отнести **эксцентриковое сверление**. Данная технология изготовления внутренних винтовых поверхностей известна с 90-х годов прошлого века, однако не получила широкого распространения. Для осуществления этого метода необходима высокая технологическая база в виде дорогостоящего узконаправленного оборудования и профилирующего инструмента. Формирование циклоидальной винтовой поверхности обоймы 2 происходит за счет копирования профилирующей режущей кромки инструмента 1 на поверхность заготовки, где частоты вращения привода инструмента 4 и заготовки 3 находятся в определенной кинематической зависимости, обеспечиваемой синхронизирующим приводом 5, причем оси вращения инструмента и заготовки смещены на эксцентриситет винтовой поверхности e (рис. 5).

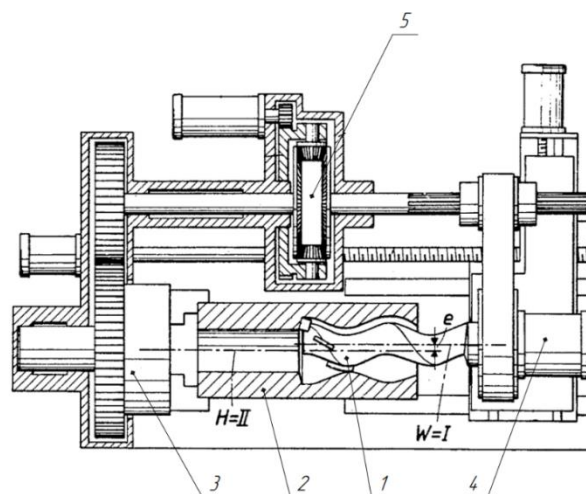


Рис. 5. Эксцентриковое сверление: 1 – профилирующий инструмент; 2 – обойма-заготовка; 3 – привод заготовки; 4 – привод инструмента; 5 – синхронизирующий привод; H – ось вращения заготовки; W – ось вращения инструмента; e – эксцентриситет вращения инструмента и заготовки
 Fig. 5. Eccentric drilling: 1 is a profiling tool; 2 is a workpiece cage; 3 is a workpiece drive; 4 is a tool drive; 5 is a synchronizing drive; H is a workpiece rotation axis; W is a tool rotation axis; e is rotation eccentricity of the tool and the workpiece

При эксцентриковом сверлении закрепление инструмента может быть консольным либо с поджатием «центра». В роли «центра» выступает базирующий элемент инструмента, опирающийся на отверстие в заготовке. При консольном закреплении инструмента для обеспечения необходимой жесткости соотношение диаметра к высоте обоймы получается большим, что лимитирует применение данной технологии при обработке металлов, но достаточно для обработки полимеров, например фторопласта. Предполагается, что при применении дополнительной опоры на внутреннее отверстие обоймы габариты получаемых деталей следующие: высота – от 200 до 1000 мм, диаметр – от 50 до 200 мм. Точность формы просверленных деталей может достигать 0,05-0,2 мм в зависимости от жесткости инструмента.

Самым современным методом получения внутренней ЦВП является **электрохимическая обработка (ЭХО)** [13]. Этот метод был разработан для обработки корпусов обойм винтовых забойных двигателей, используемых для добычи нефти. Для данных типов одновинтовых машин характерен высокий нагрев при работе в недрах земли, вследствие чего эластомерный слой быстро разрушается. Для увеличения теплоотвода из рабочей зоны винтовой пары эластомерный слой обоймы забойного двигателя должен быть тонким и равномерным по всей обойме, чтобы наиболее эффективно отводить тепло в корпус обоймы.

Сущность метода заключается в протягивании с планомерным закручиванием винтового электрода 2 по базирующему отверстию корпуса обоймы 1. Элементы электрода, не принимающие участие в обработке, покрываются изолирующим материалом 3, а подача электролита осуществляется по каналу 4 (рис. 6). Так как электрод непрерывно обрабатывает поверхность заготовки по всей площади, то точность обработанной поверхности выходит небольшая, порядка 0,15-0,4 мм.

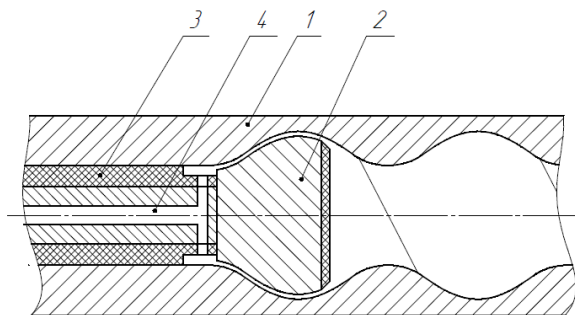


Рис. 6. Схема блока электрохимической обработки:

1 – корпус обоймы; 2 – циклоидальный винтовой электрод; 3 – изоляция; 4 – канал подачи электролита

Fig. 6. Diagram of the electrochemical processing unit: 1 is a cage body; 2 is a cycloidal screw electrode; 3 is insulation; 4 is an electrolyte supply channel

Следующий метод – это **фрезерование сферической фрезой** (рис. 7). Данная технология применяется компанией «Vert Technology» [14] для изготовления одновинтовых компрессоров конического типа, где необходим жесткий контакт между ротором и обоймой. Как следствие, эластомерного слоя у обоймы нет и контакт в героторной паре происходит между металлом ротора и металлом обоймы. Для обеспечения высокой производительности конических одновинтовых компрессоров необходимо изготавливать героторную пару с высокой точностью. Метод фрезерования сферической фрезой имеет сильные ограничения по диаметру и глубине винтовой поверхности в связи с низкой жесткостью инструмента, но для конической ЦВП это не так критично. Так, соотношение диаметра к высоте винтовой поверхности порядка 1 к 3.

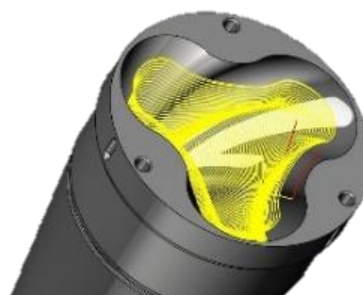


Рис. 7. Траектория движения инструмента при обработке внутренней ЦВП сферической фрезой

Fig. 7. Tool trajectory when machining an internal cycloidal helical surface with a spherical cutter

Данную стратегию обработки применяет только единственная компания, поэтому более точные сведения о данном методе не разглашаются. Современные САМ-системы не способны сгенерировать код управляющей программы для обработки внутренней ЦВП, удовлетворяющий требованиям к качеству таких поверхностей, поэтому производители винтовых объемных двигателей разрабатывают собственные уникальные технологические решения, направленные на подготовку управляющих программ для формообразования такого рода сложнопрофильных поверхностей, особенно внутренних.

Следующий метод – это **фрезерование дисковой фрезой**. При этом методе получения внутреннего винтового отверстия режущий инструмент – дисковая фреза 2 – совершает сложное вращательное движение относительно первичного и вторичного валов 3, 4 в специальной направляющей трубе 6, которая базируется по заранее точно обработанному отверстию в заготовке 1 (рис. 8). Из-за того, что инструмент базируется по заготовке, возможно обеспечение относительно высокой жесткости и тем самым есть возможность обрабатывать протяженные отверстия длиной до 2 м. Но в связи со сложной конструкцией оправки её узлы скольжения сильно лимитируют минимальный диаметр обработки, который начинается от 50 мм. Практической реализации данного метода найти

не удалось, поэтому метод ставится под сомнение с точки зрения целесообразности его применения и осуществления.

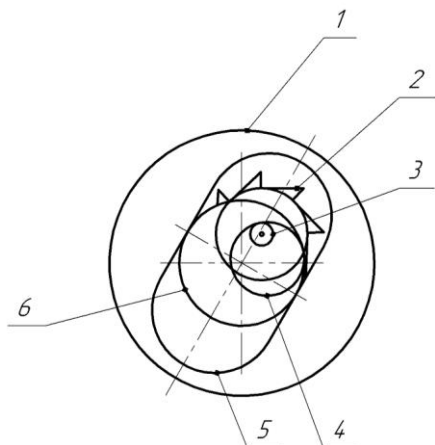


Рис. 8. Фрезерование дисковой фрезой:
1 – заготовка-обойма; 2 – режущий инструмент;
3 – первичный вал; 4 – вторичный вал
(эксцентриковый вал); 5 – профиль винтового
отверстия; 6 – направляющая труба

Fig. 8. Milling with a disc cutter:
1 is a workpiece cage; 2 is a cutting tool;
3 is an input shaft; 4 is a secondary shaft
(eccentric shaft); 5 is a screw hole profile;
6 is a guide pipe

К методам, применимым только для формирования корпуса обоймы, можно отнести **гидроформовку** [16]. Сущность метода заключается в формировании внутренней циклоидальной винтовой поверхности путем сдавливания тонкостенной металлической оболочки 3 на формирующий винтовой стержень 2 высоким давлением жидкости, поэтому точность полученной поверхности низкая, порядка 1-5 мм. К преимуществам такого метода можно отнести простоту изготовления формы (рис. 9) и производительность формирования винтовой поверхности. Однако гидроформовка применима только к пластичным материалам, причем заготовка должна обладать низкой жесткостью для её деформации давлением воды, поэтому получить мелкоразмерные детали не получится. Габариты винтовых поверхностей, полученных данным методом, начинаются от длины 400 мм и диаметра 50 мм, причем всегда остаются недеформированные края, которые нужно дополнительно обрабатывать.

Следующий метод формирования корпуса обоймы – это **прессование** [17]. Заготовка в виде трубы прессуется между сложнопольными матрицами, в связи с этим точность поверхности очень низкая, порядка 2-8 мм, причем на изделии образуется облой (рис. 10), который необходимо удалить. К преимуществам данного метода можно отнести высокую производительность метода, высокую повторяемость получаемых поковок. Высота получаемых заготовок начинается от 50 мм, а диаметр от 10 мм и ограничивается только размерами и возможностями пресса.

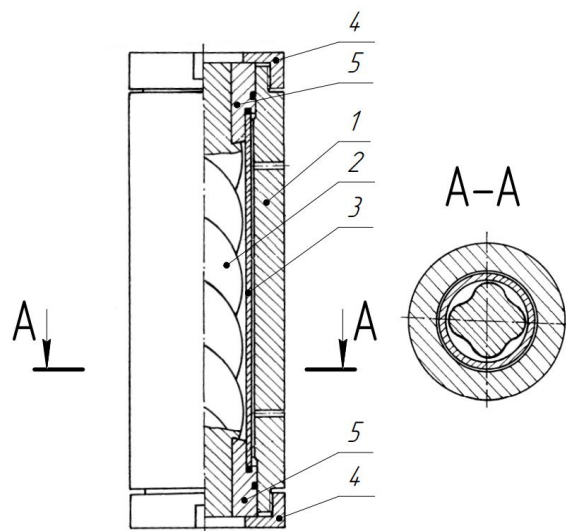


Рис. 9. Общий вид формы для гидроформовки корпуса обоймы одновинтового насоса:
1 – корпус; 2 – формирующий винтовой стержень; 3 – трубчатая заготовка; 4 – стягивающие гайки; 5 – центрирующие втулки

Fig. 9. General view of the mold for hydroforming the cage body of a single-screw pump:
1 is a body; 2 is a forming screw rod;
3 is a tubular blank; 4 are tightening nuts;
5 are centering bushings



Рис. 10. Корпуса обойм, изготовленные методом прессования

Fig. 10. Cage bodies made by a pressing method

Данный метод широко распространен при серийном производстве корпусов обойм одновинтовых машин, в связи с тем, что зачастую корпусу обоймы не требуется высокая точность, а также при этом методе обеспечивается низкая себестоимость при больших партиях.

К возможным методам формирования мелкоразмерных корпусов обойм можно отнести **накатку роликами** (рис. 11). Производительный метод изготовления винтовых поверхностей, при котором профи-

лирующие ролики продавливают наружную поверхность таким образом, чтобы внутри формировался циклоидальный винтовой профиль, является способом получения внутренней поверхности с низкой точностью, порядка 5-10 мм, даже на небольших габаритах обойм. Диаметр получаемых обойм не превышает 10-100 мм, но зато высота накатанного профиля может достигать до 6 м, что не требуется при сравнительно низком диаметре.



Рис. 11. Установка накатки винтовых труб
Fig. 11. A screw pipe knurling machine

Следующий возможный метод – это **порошковая металлургия** [18]. Сложнопрофильную винтовую поверхность возможно изготовить и методами порошковой металлургии (рис. 12). Сущность метода заключается в прессовании металлического порошка в форму с последующим спеканием спрессованной заготовки в печи при высокой температуре. Но габариты получаемых деталей из порошка металлов сильно ограничены и, как правило, не превышают 100 мм по толщине. Также применение данного метода ограничено винтовым стержнем, который может быть затруднительно извлечь из получаемой спрессованной заготовки. Но при изготовлении мелкогабаритных конических винтовых обойм, используемых в микрокомпрессорах, не возникает проблемы извлечения стержня, так как у поверхности стержня есть уклоны. Разработка технологии изготовления винтовых обойм из порошковых металлов позволит расширить область применения одновинтовых машин и повысить их долговечность и надежность. Причем точность деталей, полученных порошковой металлургией, очень высокая и составляет порядка 0,02 мм, что обеспечит высокую точность конечного устройства.

Современные темпы развития 3D-печати позволили применять **аддитивные технологии** при изготовлении практически любых деталей. Методы аддитивной технологии получили широкое распространение во всех сферах производства. Так, корпус обоймы одновинтовых машин может быть напечатан FDM-

печатью из пластика PLA+ с последующей заливкой в него полиуретанового компаунда (рис. 13). Также на сегодняшний день широко распространена печать эластомерным термопластичным полиуретаном, из которого можно создать уже рабочую эластомерную часть обоймы. Причем точность 3D-печати относительно высока и может достигать 0,1 мм, также возможна печать мелкогабаритных деталей высотой от 10 мм и диаметром от 5 мм, а максимальные габариты печати ограничиваются только размерами самого принтера и могут достигать нескольких метров. К недостаткам данной технологии можно отнести ограниченность используемых материалов, низкие прочностные характеристики получаемых изделий, а также низкую производительность изготовления деталей. Этот метод получил широкое распространение при прототипировании различных узлов машин и агрегатов в связи с высокой гибкостью изготовления.



Рис. 12. Героторная пара, спеченная из металлического порошка
Fig. 12. Gerotor pair sintered from metal powder



Рис. 13. Корпус обоймы в разрезе, напечатанный на 3D-принтере
Fig. 13. Sectional view of the 3D printed cage

В результате исследования технологических возможностей методов формообразования внутренних циклоидальных винтовых поверхностей была сформирована **таблица**. Рассмотренные методы могут применяться для изготовления как корпусов обойм, так и для формообразования внутренней рабочей поверхности героторной пары.

Некоторые методы, представленные в **таблице**, применимы только для изготовления внутренней ЦВП из эластомерных материалов, что не позволяет изготовить рабочую поверхность обоймы из химически стойких фторопластов. Другие методы могут быть применены только к пластически деформируемым материалам, некоторым пластмассам и металлам. Такими методами зачастую изготавливают корпуса обойм одновинтовых машин, так как методы производительные, но не обладают высокой точностью. Также на сегодняшний день не существует метода изготовления высокоточной мелкогабаритной внутренней ЦВП с опти-

мальным соотношением высоты к диаметру обоймы, обеспечение которого необходимо для надежной работы прецизионных одновинтовых дозаторов. Отсутствует высокоточный лезвийный метод изготовления внутренних ЦВП со следующими размерными параметрами: диаметр – до 10 мм, высота – до 100 мм. Наиболее перспективным направлением для разработки метода обработки внутренней ЦВП может послужить метод эксцентрикового сверления или метод фрезерования сферической фрезой. С точки зрения авторов, наиболее перспективным является метод эксцентрикового сверления, который может быть применим для изготовления не только рабочей поверхности обоймы, но и для формообразования винтового корпуса обоймы. Также данный метод может обеспечить высокую производительность и точность обработки, но требует разработки специального инструмента и специализированного оборудования.

Таблица. Сравнение методов получения внутренней сложнопрофильной поверхности
Table. Comparison of methods for producing an internal geometrically complex surface

Метод	Ограничение применяемого материала	Получаемая точность формы, мм	Высота	Диаметр	Особенности
Литьё полимера в форму	Полиуретаны, силиконы	0,04-0,2	От 100 до 2000 мм	От 10 до 200 мм	Точность зависит от усадки материала
Прессование полимера в форму	Каучуки NBR, FKM, EPDM	0,1-0,3	От 100 до 2000 мм	От 10 до 200 мм	Точность зависит от усадки материала
Эксцентриковое сверление	Металл, пластик	0,05-0,2	От 200 до 1000 мм	От 50 до 200 мм	Применяется инструмент с профилирующими лезвиями
ЭХО	Электропроводящие материалы	0,15-0,4	От 500 до 3000 мм	От 50 до 300 мм	Очень долгая обработка поверхности
Фрезерование сферической фрезой	Металл, пластик	н/д	От 100 до 500 мм	От 30 до 300 мм	Применяется для конических поверхностей компанией «Vert Technology»
Фрезерование дисковой фрезой	Металл, пластик	н/д	От 400 до 2000 мм	От 50 до 300 мм	Низкая жесткость инструмента, высокое соотношение диаметра к длине
Гидроформовка	Пластичные материалы	1-5	От 400 до 1500 мм	От 50 до 300 мм	Только для тонкостенных деталей
Прессование	Пластичные материалы	2-8	От 50 до 1000 мм	От 10 до 200 мм	Остается линия разъёма матрицы
Накатка	Пластичные материалы	5-10	От 200 до 6000 мм	От 10 до 100 мм	Низкая точность формы внутренней поверхности
Порошковая металлургия	Металлические порошки	0,01-0,05	От 20 до 100 мм	От 5 до 200 мм	Сложность в извлечении стержня
Аддитивные технологии	Металлы и пластики	0,1-0,5	От 10 до 500 мм	От 5 до 300 мм	Не для серийного производства, ограничение по материалам

Заключение

Обзор показывает, что текущее состояние технологической подготовки производства деталей, содержащих внутренние ЦВП, не охватывает все направления развития конструкции одновинтовых объёмных машин. Многие рассмотренные методы обладают низкой технологической гибкостью и не соответствуют требованиям современного автоматизированного производства, что и обуславливает их малую распространённость. При этом нельзя не отметить экспоненциальный рост интереса к одновинтовой технике в мире. Уникальные технические возможности одновинтовых машин обуславливают этот интерес для совершенно полярных областей применения: в нефтегазовой промышленности – это одновинтовые забойные двигатели с размерами сечения рабочих органов до 600 мм, в электронике – это высокоточные дозирующие машины с размерами сечения от 3 мм. Такая масштабная дифференциация конструкции и разнообразие применяемых материалов требуют развития новых методов изготовления рабочих органов, содержащих ЦВП. Проанализировав текущую ситуацию, очевидно, что направления технологической науки, связанные с подготовкой производства и разработкой автоматизированных методов обработки внутренних ЦВП, являются важной стратегической задачей для промышленности любой индустриальной страны.

Наиболее остро ощущается необходимость в разработке технологических подходов, позволяющих формообразовывать мелкоразмерные внутренние циклоидальные винтовые поверхности из химически стойких полимеров. Детали, изготовленные таким методом из фторсодержащих полимеров, могут применяться в высокоточных дозирующих системах при работе с химически агрессивными средами. Реализация производства такого оборудования в нашей стране позволит повысить надежность, качество и снизить стоимость производства изделий силовой и микроэлектроники.

Список источников

- Балденко Д.Ф., Коротаев Ю.А. Современное состояние и перспективы развития отечественных винтовых забойных двигателей // Бурение и нефть. 2012. №3. С. 3-7.
- Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д. Одновинтовые гидравлические машины в нефтегазовой промышленности: области применения и перспективы развития // Булатовские чтения. 2020. Т. 6. С. 48-53.
- Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д. История создания в России одновинтовых гидравлических машин // Бурение и нефть. 2021. №12. С. 4-10.
- Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д. Одновинтовые насосы в нефтяной промышленности – вчера, сегодня, завтра // Бурение и нефть. 2023. №7-8. С. 60-67.
- Исхаков Р.Р. Проблемы эффективности подачи химических реагентов // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2017. №1(16). С. 42-43.
- Numerical modeling on friction and wear behaviors of all-metal progressive cavity pump / Gang Cao, JiaNing Zhang, Yanbao Guo, Chuang Liu, Marembo Micheal, ChengSi Lv, Hao Yu, HengAn Wu // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022, vol. 213, 110443. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110443
- Пат. 2325557 Российская Федерация, МПК F04C 2/107. Способ изготовления статора одновинтового насоса / А.В. Алтынов, М.В. Алтынова, А.Н. Карпов, О. А. Карпов, В. Г. Тамурка; заявитель и патентообладатель ФГУП «Центральное научно-конструкторское бюро» (ФГУП «ЦНКБ»). № 2006141379/06; заявл. 23.11.2006; опубл. 27.05.2008.
- Пат. 2500513 Российская Федерация, МПК B23P 15/00. Способ изготовления статора одновинтового насоса / А.Г. Мелехин, А.М. Минченков, В.Б. Шатров; заявитель и патентообладатель АО «Научно-производственное объединение "Искра"». № 2012145128/02; заявл. 23.10.2012; опубл. 10.12.2013.
- Гончаров А.А., Васильев А.С., Гемба И.Н. Современные методы обработки винтовых поверхностей роторов винтовых насосов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. №1(40). С. 202-208.
- Современные методы финишной обработки циклоидальных винтовых поверхностей / П.Д. Акулиничев, М.А. Альбов, И.О. Зенин, И.Н. Гемба // Справочник. Инженерный журнал. 2021. №9(294). С. 3-11. DOI: 10.14489/hb.2021.09.pp.003-011
- Современные методы отделочно-упрочняющей обработки циклоидальных винтовых поверхностей / П.Д. Акулиничев, М.А. Альбов, А.А. Гончаров, И.О. Зенин // Справочник. Инженерный журнал. 2022. №11(308). С. 16-23. DOI: 10.14489/hb.2022.11.pp.016-023
- Patent 5150518 USA, IPC B23B5/46; B23C3/32; (IPC1-7): B23P15/10. Process for manufacturing inner and outer parts for a rotary piston machine in which the inner and outer parts have parallel axes / Erwin Fuchs; Assignee: Weingartner, Maschinenbau Gesellschaft M. B. H. (Kirchham, AT); filing date: 22.03.199; publication date: 29.09.1992.
- Пат. № 270988 Российская Федерация, МПК B23H 3/04, B23H 9/00. Электродный блок для электрохимической обработки винтового зубчатого профиля в отверстии трубчатой заготовки / Д.Н. Хайруллин, И.А. Мочалин, С.В. Мезенцев; заявитель и патентообладатель ООО «Фирма "Радиус-Сервис"». №2019106450; заявл. 06.03.2019; опубл. 23.12.2019.
- Производитель конических одновинтовых компрессоров Vert Technologies: [Электронный ре-

- сурс]. URL: <https://vertrotors.wordpress.com/>. (Дата обращения: 14.09.23).
15. Patent 20160158852 USA, IPC B23C3/32. Method and device for producing a cavity in a stator of a progressive cavity pump / Ralf Daunheimer; Assignee: Ralf Daunheimer; filing date: 17.07.2014; publication date: 09.06.2016.
 16. Пат. 2038459 Российская Федерация, МПК E21B 4/02. Способ изготовления трубчатой оболочки ротора винтового забойного двигателя / А.М. Кочнев, А.Н. Вшивков, В.Б. Голдобин, В.В. Хохлов; заявитель и патентообладатель Пермский филиал Всероссийского научно-исследовательского института буровой техники. № 5055938/03; заявл. 23.06.1992; опубл. 27.06.1995.
 17. Исследование процесса прессования медных труб и полых профилей на бутылочных иглах / В.Г. Белов, Т.Н. Боровик, К.В. Королев // Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике: сборник докладов Рос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. М.: Изд-во МИРЭА – Российский технологический университет, 2019. Т. 1. С. 314-319.
 18. Порошковая металлургия в Беларуси и в мире: тенденции развития и взаимное влияние / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, В.В. Савич // Актуальные проблемы порошкового материаловедения: материалы междунар. науч.-техн. конф. Пермь: Изд-во Пермского нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. С. 11-20.
 19. Пархимович А.Б., Краснова А.В., Воейко О.А. Современное состояние и перспективы технологий аддитивного производства // Вестник молодой науки России. 2019. №3. С.10.
 20. iors of all-metal progressive cavity pump. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022;213:Article ID 110443. ISSN 0920-4105. DOI:10.1016/j.petrol.2022.110443
 7. Altynov A.V., Altynova M.V., Karpov A.N., Karpov O.A., Tamurka V.G. *Sposob izgotovleniia statora odnovintovogo nasosa* [Method for manufacturing the stator of a single screw pump]. Patent RU, no. 2325557, 2008.
 8. Melekhin A.G., Minchenkov A.M., Shatrov V.B. *Sposob izgotovleniia statora odnovintovogo nasosa* [Method for manufacturing the stator of a single screw pump]. Patent RU, no. 2500513, 2013.
 9. Goncharov A.A., Vasilev A.S., Gemba I.N. Modern methods of processing screw surfaces of screw pump rotors. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P.A. Soloveva* [Vestnik of Soloviev Rybinsk State Aviation Technological Academy]. 2017;(1(40)):202-208. (In Russ.)
 10. Akulinichev P.D., Albov M.A., Zenin I.O., Gemba I.N. Modern methods of finishing cycloidal helical surfaces. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. Engineering Journal]. 2021;(9(294)):3-11. DOI:10.14489/hb.2021.09.pp.003-011
 11. Akulinichev P.D., Albov M.A., Goncharov A.A., Zenin I.O. Modern methods of finishing and strengthening treatment of cycloidal helical surfaces. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. Engineering Journal]. 2022;(11(308)):16-23. DOI:10.14489/hb.2022.11.pp.016-023
 12. Erwin Fuchs. Process for manufacturing inner and outer parts for a rotary piston machine in which the inner and outer parts have parallel axes. Patent USA, no. 5150518, 1992.
 13. Khairullin D.N., Mochalin I.A., Mezentsev S.V. *Elektroodnyi blok dlya elektrokhimicheskoy obrabotki vintovogo zubchatogo profilya v otverstii trubchatoy zagotovki* [Electrode unit for electrochemical processing of helical gear profile in the hole of a tubular workpiece]. Patent RU, no. 270988, 2019.
 14. Manufacturer of conical single-screw compressors Vert Technologies. [Electronic resource]. Available at: <https://vertrotors.wordpress.com/>. (Accessed on September 14, 2023).
 15. Ralf Daunheimer. Method and device for producing a cavity in a stator of a progressive cavity pump. Patent USA, no. 20160158852, 2016.
 16. Kochnev A.M., Vshivkov A.N., Goldobin V.B., Khokhlov V.V. *Sposob izgotovleniya trubchatoy obolochki rotora vintovogo zaboyного dvigatelya* [Method for manufacturing a tubular rotor shell of a screw downhole motor]. Patent RU, no. 2038459, 1995.
 17. Belov V.G., Bоровик T.N., Korolev K.V. Study on the pressing process of copper pipes and hollow profiles on bottle needles. *Informatika i tekhnologii. Innovatsionnye tekhnologii v promyshlennosti i informatike: Sbornik докладов Rossiiskoy nauch.-tekh.*

References

1. Baldenko D.F., Korotaev Yu.A. Current state and prospects for development of domestic screw downhole motors. *Burenie i nef't* [Drilling and Oil]. 2012;(3):3-7. (In Russ.)
2. Baldenko D.F., Baldenko F.D. Single-screw hydraulic machines in the oil and gas industry: areas of application and development prospects. *Bulatovskie chteniia* [Bulatov readings]. 2020;6:48-53. (In Russ.)
3. Baldenko D.F., Baldenko F.D. History of the creation of single-screw hydraulic machines in Russia. *Burenie i nef't* [Drilling and Oil]. 2021;(12):4-10. (In Russ.)
4. Baldenko D.F., Baldenko F.D. Single screw pumps in the oil industry: yesterday, today, tomorrow. *Burenie i nef't* [Drilling and Oil]. 2023;(7-8):60-67. (In Russ.)
5. Iskhakov R.R. Problems of efficiency of chemical reagent supply. *Molodezhnyi vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Youth Bulletin of Ufa State Aviation Technical University]. 2017;(1(16)):42-43. (In Russ.)
6. Gang Cao, JiaNing Zhang, Yanbao Guo, Chuang Liu, Marembo Micheal, ChengSi Lv, Hao Yu, HengAn Wu. Numerical modeling on friction and wear behav-

- konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Computer science and technology. Innovative technologies in the industry and computer science: Proceedings of the Russian Scientific and Technical Conference with International Participation]. Moscow: Publishing House of MIREA – Russian Technological University, 2019, vol. 1, pp. 314-319. (In Russ.)
18. Vityaz P.A., Ilyushchenko A.F., Savich V.V. Powder metallurgy in Belarus and in the world: development trends and mutual influence. *Aktualnye problemy poroshkovogo materialovedeniya: Materialy mezhdunarodnoy nauch.-tekhn. konferentsii* [Currently relevant issues of powder materials science: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Perm: Publishing House of Perm National Research Polytechnic University, 2018, pp. 11-20. (In Russ.)
19. Parkhimovich A.B., Krasnova A.V., Voeiko O.A. Current state and prospects of additive manufacturing technologies. *Vestnik molodezhnoy nauki Rossii* [Bulletin of Youth Science of Russia]. 2019;(3):10. (In Russ.)

Поступила 11.03.2024; принята к публикации 28.06.2024; опубликована 30.09.2024
Submitted 11/03/2024; revised 28/06/2024; published 30/09/2024

Альбов Максим Александрович – аспирант, ассистент кафедры технологии машиностроения, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.
Email: maxim.albom@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0753-6946

Акулиничев Павел Дмитриевич – аспирант, ассистент кафедры технологии машиностроения, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.
Email: aka111996@mail.ru. ORCID 0000-0003-1846-7955

Гончаров Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.
Email: al.goncharow@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3121-9120

Maksim A. Albov – postgraduate student, Teaching Assistant of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.
Email: maxim.albom@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-0753-6946

Pavel D. Akulinichev – postgraduate student, Teaching Assistant of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.
Email: aka111996@mail.ru. ORCID: 0000-0003-1846-7955

Alexander A. Goncharov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.
Email: al.goncharow@yandex.ru. ORCID: 0000-0003-3121-9120