

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.9.04

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СПЕЦИАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ  
ОБРАБОТКИ ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
НЕПРОФИЛИРОВАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ© 2024 г. А. А. Гончаров<sup>1, \*</sup>, П. Д. Акулиничев<sup>1</sup>, М. А. Альбов<sup>1</sup>, И. О. Зенин<sup>1</sup><sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

\*e-mail: al.goncharow@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.11.2023 г.

После доработки 04.12.2023 г.

Принята к публикации 15.12.2023 г.

В винтовых объемных машинах в качестве рабочих органов используются циклоидальные винтовые поверхности сложного профиля. Статья посвящена изучению технологических возможностей подготовки производства таких винтовых поверхностей с помощью специальной стратегии обработки непрофилированным инструментом на 4-координатном станке с ЧПУ. В ходе исследования предложен специальный аналитический критерий, позволяющий оценить возможность обработки винтовых поверхностей с различными параметрами. Выполнен машинный эксперимент, подтверждающий работоспособность предложенного критерия, а также серия натуральных экспериментов.

*Ключевые слова:* ротор, героторная пара, винтовая поверхность, циклоидальная винтовая поверхность, обработка, станок с ЧПУ, технологические возможности, технология машиностроения

**DOI:** 10.31857/S0235711924020077, **EDN:** QVVDMT

Изучение закономерностей взаимодействия в системе «станок–инструмент–пригодность–заготовка» является важной технологической задачей, раскрывающей потенциальную возможность повышения качества обрабатываемой детали за счет грамотного назначения различных параметров обработки [1–5]. Одной из областей, в которой данные взаимосвязи изучены не в полной мере, является обработка циклоидальных сложнопрофильных винтовых поверхностей. Такие поверхности нашли применение при изготовлении рабочих органов одновинтовых объемных машин (рис. 1). Подобные машины широко используются в различных областях: в пищевой промышленности, в химической отрасли, для транспортировки нефтепродуктов [6, 7]. Основным способом производства винтовых поверхностей является их изготовление с помощью специальных профилированных инструментов путем копирования, однако такой способ не является гибким и имеет ряд ограничений [8–11]. Вместо традиционного способа в настоящей статье предложена специальная стратегия обработки винтовых поверхностей на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) непрофилированным инструментом.

Одной из перспективных сфер применения одновинтовых объемных машин является высокоточное дозирование веществ различной вязкости, в том числе высоковязких [12]. Рабочим органом таких дозаторов является миниатюрная прецизионная

героторная пара, состоящая из металлического ротора и полимерной обоймы (рис. 2). Ввиду высоких требований по точности дозирования при изготовлении рабочих органов для таких дозаторов применяются повышенные требования к точности их формы. Также отличительной особенностью таких героторных пар являются их малые размеры – диаметр ротора составляет 3–8 мм.

Формообразование таких миниатюрных поверхностей обычными для крупнобаритных изделий методами практически невозможно из-за малой жесткости обрабатываемой заготовки [13]. Для решения проблемы авторами данной работы была предложена специальная стратегия обработки миниатюрных винтовых поверхностей цилиндрической фрезой на 4-координатных станках с ЧПУ (рис. 3).

**Постановка задачи.** Предложенная стратегия обработки винтовых поверхностей цилиндрической фрезой на 4-координатных станках с ЧПУ реализуется с помощью



Рис. 1. Винтовой насос.

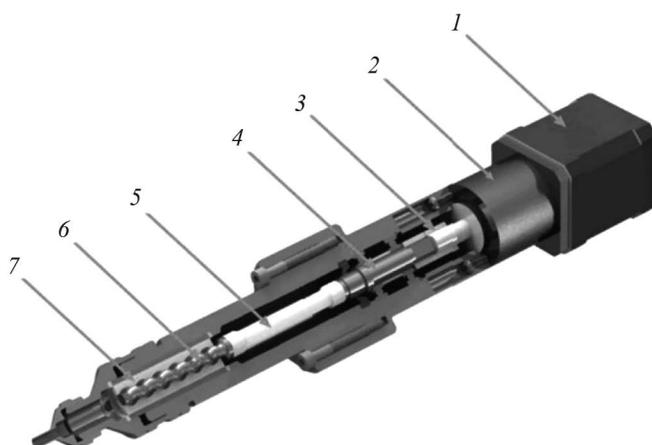
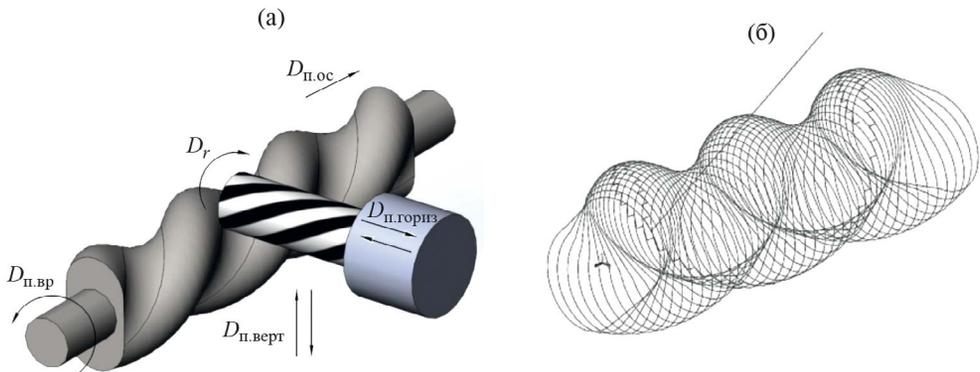


Рис. 2. Сечение высокоточного одновинтового дозатора: 1 – шаговый двигатель; 2 – планетарный редуктор; 3 – муфта; 4 – ступичный узел; 5 – карданный вал; 6 – ротор; 7 – статор.

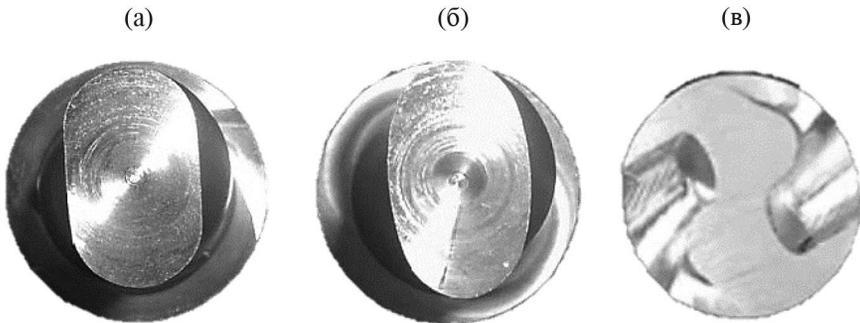
разработанного алгоритма, описывающего движение фрезы и заготовки в параметрическом виде. Работа алгоритма реализована в виде программы, на входе получающей параметры обрабатываемых поверхностей, а на выходе предлагающей программу управления станком, описывающую координаты заготовки и инструмента в каждый момент времени (G-код). Однако как показала практика, при некоторых заданных параметрах обработки (диаметр сечения, шаг, эксцентриситет винтовой поверхности и диаметр фрезы) возникает подрезание сформированного профиля детали используемым инструментом (рис. 4).

Таким образом, представленные результаты демонстрируют необходимость исследования существующих геометрических ограничений на соотношение между диаметром сечения ротора, его шагом, эксцентриситетом, а также диаметром используемой фрезы, при которых не будет происходить вырождения профиля детали. Полученные ограничения позволят своевременно выявлять ситуации, при которых заданные параметры обработки могут привести к браку изделия.

**Разработка аналитического выражения ограничительного критерия.** Для разработки критерия, накладывающего ограничения на параметры диаметра сечения ротора, его шаг, эксцентриситет, а также диаметр используемой фрезы при

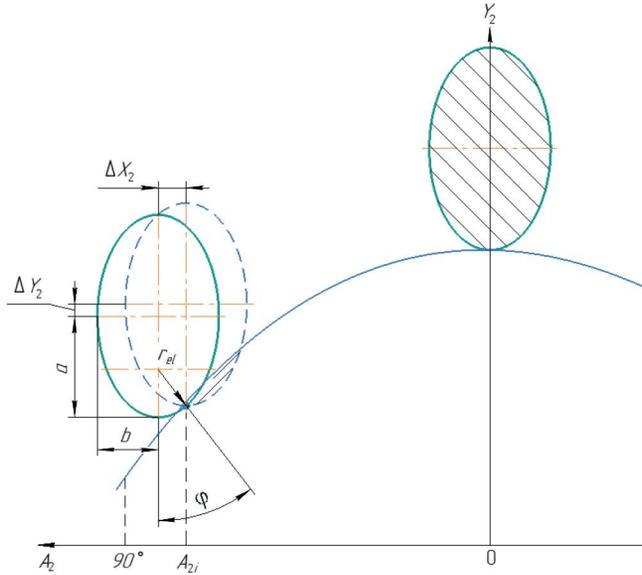


**Рис. 3.** Специальная стратегия обработки миниатюрных винтовых поверхностей: (а) – схема обработки; (б) – траектория движения инструмента.



**Рис. 4.** Результаты обработки ротора с помощью специальной стратегии обработки при различных входных параметрах: (а) – подрезание отсутствует; (б), (в) – отклонение формы от заданной в результате подрезания.





**Рис. 6.** Расположение сечения фрезы и заготовки в плоскости  $X_2OY_2$  при разных углах:  $r_{el}$  – радиус-вектор от фокуса эллипса до точки касания сечений;  $\varphi$  – угол между вертикалью и нормалью к поверхности заготовки в точке касания;  $a$  – большая полуось эллипса;  $b$  – малая полуось эллипса.

Кроме того,

$$r_{el}(t) = \frac{b}{\sqrt{1 - \left(\frac{b^2}{a^2}\right) \cos^2 \varphi(t)}},$$

$$\varphi(t) = \varphi_m \sin(A_{2i}(t)),$$

где  $\varphi_m$  – максимальный угол отклонения фрезы, град;  $\varphi_m = 360e/h$ ;  $b = R/2$  – малая полуось эллипса;  $a = \frac{R}{2\cos\varphi(t)}$  – большая полуось эллипса;  $A_{2i} = (t - 45^\circ) + \gamma(t)$  – условный угол отклонения фрезы от плоскости обрабатываемого участка.

Делая замену  $t = A1$  в (1), можно получить следующее условие:

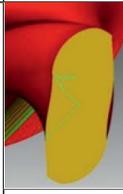
$$K_\alpha = -(e+r) \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \left( 1 - \frac{\arctg\left(\frac{r}{e}\right)}{\arctg\left(\frac{r}{e}\right) + \frac{\pi}{4}} \right) - \frac{R}{2\sqrt{1 - \left(1 - \frac{\pi^2 e^2}{4h^2}\right) \cos^2\left(\frac{2\pi e}{h}\right)}} \times$$

$$\times \left( 1 - \left| \cos\left(\frac{2\pi e}{h}\right) \right| \right) \sin\left(\frac{3\pi}{4} - \arctg\left(\frac{r}{e}\right)\right) \geq 0. \quad (2)$$

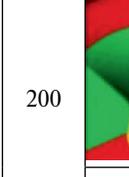
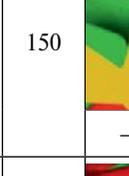
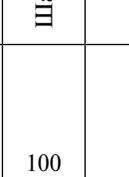
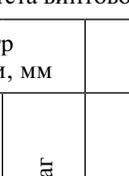
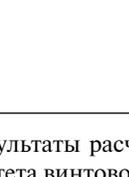
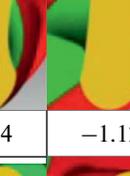
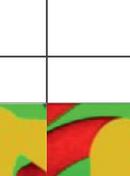
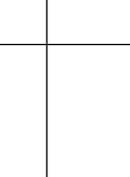
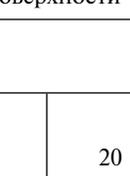
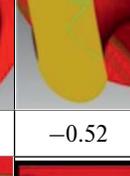
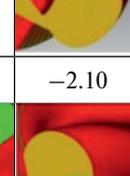
**Экспериментальное подтверждение полученных ограничений.** Работоспособность аналитического выражения критерия, накладывающего ограничения на параметры диаметра сечения ротора, его шаг, эксцентриситет, а также диаметр используемой фрезы при обработке винтовой поверхности на 4-координатном станке с ЧПУ с помощью предложенной специальной стратегии обработки, можно проверить с помощью серии экспериментов. На первом этапе был проведен машинный эксперимент с использованием верификатора G-кода. Значение критерия рассчитывалось по выведенной формуле (2). Результаты проведенного эксперимента представлены в табл. 1 и 2.

В результате анализа полученных значений ограничительного критерия при различных параметрах шага и эксцентриситета винтовой поверхности, а также различных диаметрах обрабатывающей фрезы, можно заключить, что геометрически верные сечения винтовой поверхности, выделенные рамкой в табл. 1 и 2, получены при положительных значениях ограничительного критерия, тогда как при отрицательных значениях имеются факты подрезания поверхности.

**Таблица 1.** Результаты расчета ограничительного критерия при различных параметрах шага винтовой поверхности и диаметра обрабатывающей фрезы

Параметр поверхности, мм			Диаметр фрезы, мм					
Диаметр сечения	Эксцентриситет	Шаг	40	20	16	10	6	2
15	15	100						
			-8.44	-4.22	-3.38	-2.10	-1.26	-1.10
15	15	150						—
			-2.06	-1.03	-0.33	0.21	0.31	—
15	15	200						—
			-0.25	-0.01	0.12	0.15	0.23	—

**Таблица 2.** Результаты расчета ограничительного критерия при различных параметрах шага и эксцентриситета винтовой поверхности

Параметр поверхности, мм			Эксцентриситет, мм					
Диаметр сечения	Диаметр фрезы	Шаг	25	20	15	10	5	2
15	10	100						
					-2.10	-0.31	0.11	0.12
15	10	150						
			-3.84	-1.12	-0.52	0.04	0.14	0.11
15	10	200						
			-0.78	-0.08	0.04	0.09	-	-

В дополнение к машинному был также проведен натурный эксперимент. В ходе эксперимента в качестве заготовок для обработки использовались прутки из алюминиевого сплава В95Т. Обработка проводилась на 4-осевом горизонтально-фрезерном станке с ЧПУ, оснащенный поворотным столом. При формировании программы для обработки (G-кода) в качестве входных параметров винтовой поверхности выставлялись следующие величины: диаметр 9.8 мм; эксцентриситет 3.4 мм; шаг 36.0 мм. Используемые для обработки фрезы варьировались: выбор их диаметра проводился с использованием разработанного ограничительного критерия. В итоге для проведения эксперимента были выбраны фрезы диаметром 3, 4, 5 и 6 мм, которые согласно проведенной с помощью ограничительного критерия проверки должны обеспечивать геометрию ротора без подрезки. На рис. 7 представлены результаты проведенной обработки.

Как показал эксперимент, геометрия полученных винтовых роторов во всех случаях соответствовала заданной.

**Выводы.** В ходе проведенного исследования получено аналитическое значение критерия, описывающего ограничения на соотношение между параметрами диаметра сечения ротора, его шагом, эксцентриситетом, а также диаметром используемой фрезы при обработке винтовой поверхности на 4-координатном станке



Рис. 7. Винтовые роторы, обработанные фрезами различного диаметра.

с ЧПУ с помощью предложенной специальной стратегии обработки. Проведен машинный эксперимент, показывающий, что при положительных значениях данного критерия профиль обрабатываемой поверхности соответствует заданным значениям, тогда как при отрицательном значении критерия происходит подрезка обработанной поверхности и вследствие этого отклонение профиля от заданного. Работоспособность критерия была также проверена на серии натуральных экспериментов, при которых проводилась обработка роторов фрезами различного диаметра.

Полученный ограничительный критерий может быть интегрирован в специализированную программу, подготавливающую управляющий код для станка с ЧПУ для обработки циклоидальных винтовых поверхностей. Введение такого критерия значительно сократит количество возникающего брака и трудоемкость технологической подготовки производства миниатюрных героторных пар.

**Финансирование работы.** Работа выполнялась в рамках подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора наук Гончаровым Александром Александровичем на базе МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность Гончаровой Юлии Александровне за помощь в подготовке статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chikhacheva N. Y., Shchedrin A. V., Bekaev A. A., Burlakova T. A.* Influence of the Tool's Surface Microgeometry and the Lubricant Composition on Hole Precision in Hybrid Burnishing // *Russian Engineering Research*. 2022. V. 42. Is. 8. P. 781. <https://doi.org/10.3103/S1068798X2208010X>
2. *Kovalev A. A., Krasko A. S., Rogov N. V.* Evaluation of the Surface Roughness of Machine Parts with Wear-Resistant Gas Thermal Coatings during Turning // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2022. V. 51. Is. 6. P. 540. <https://doi.org/10.3103/S1052618822050089>
3. *Fanidi O., Kostryukov A., Shchedrin A.* Predicting the Burnishing Force for Cylindrical Workpieces with Amodified Surface Layer // *Strojnický Casopis*. 2022. V. 72. Is. 1. P. 35. <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0004>
4. *Magomedov M. K., Gromov A. E., Yakovlev A. V.* Adjustment of Impact and Laser Systems when Engraving Materials with Indeterminate Characteristics // *Russian Engineering Research*. 2022. V. 42. Is. 1. P. 1. <https://doi.org/10.3103/S1068798X22010130>

5. *Yakovleva A., Isaenkova M., Minushkin R.* The Effect of Combined Processing on Residual Stresses in the Surface Layer of Power Plant Parts // *Materials*. 2022. V. 15. Is. 2. P. 420.  
<https://doi.org/10.3390/ma15020420>
6. *Ponomarev B. B., Hien N. S.* Finish Milling Dynamics Simulation Considering Changing Tool Angles // *IOP Conf. Series: Material Science and Engineering*. 2018. V. 327. Is. 2. P. 022083.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022083>
7. *Krasnyi V. A., Maksarov V. V.* Improving Wear Resistance of Friction Assemblies of Oilwell Pumps Having Seals from Directionally Reinforced Polymer Composites // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. V. 53 (1–2). P. 121.  
<https://doi.org/10.1007/s10556-017-0306-x>
8. *Olt J., Liivapuu O., Maksarov V., Liivapuu A., Tärkla T.* Mathematical Modelling of Cutting Process System // *Springer Proceedings in Mathematics and Statistics*. 2016. V. 178. P. 173.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-42082-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42082-0_11)
9. *Lebedev V. A., Serga G. V., Khandozhko A. V.* Increase of Efficiency of Finishing-Cleaning and Hardening Processing of Details Based on Rotor-Screw Technological Systems // *IOP Conf. Series: Material Science and Engineering*. 2018. V. 327. Is. 4. P. 042062.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042062>
10. *Рязанцев В. М.* Роторно-вращательные насосы с циклоидальными зацеплениями. М.: Машиностроение, 2005. 345 с.
11. *Alekseeva L. B., Maksarov V. V.* Evaluation of Effect of Oil Film of Rotor Bearing // *IOP Conf. Series: Material Science and Engineering*. 2018. V. 327. Is. 2. P. 022003.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022003>
12. *Sacher C., Pössnicker D.* Low-Shear Dosing of Micro-Encapsulated Adhesives // *Adhesion Adhesives & Sealants*. 2013. V. 10. Is. 2. P. 21.  
<https://doi.org/10.1365/s35784-013-0158-5>
13. *Гончаров А. А.* Технологическое обеспечение точности циклоидальных винтовых поверхностей при их обработке непрофилированным инструментом на станках с ЧПУ // *Черные металлы*. 2020. № 11. С. 56.  
<https://doi.org/10.17580/chm.2020.11.08>