

Анализ методов обеспечения точности профиля резьбы шарико-винтовых передач

Analysis of methods for ensuring the accuracy of the thread profile of ball-screw gears

Богущий В.Б.

Канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
e-mail: bogutskivb@yandex.ru

Bogutsky V. B.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology of Mechanical Engineering, Sevastopol State University, Sevastopol
e-mail: bogutskivb@yandex.ru

Аннотация

В статье выполнен анализ существующих методов формирования резьбы на винтах шарико-винтовых передач. Показано, что способы лезвийной обработки и пластического деформирования позволяют обеспечить требуемую точность и шероховатость поверхности резьбы только на деталях из незакаленных сталей. Основным методом, обеспечивающим необходимую точность профиля и качества поверхности резьбы на закаленных деталях, является шлифование, однако, достижение требуемого качества поверхности реализуется при низкой интенсивности съема металла. Для повышения производительности процесса шлифования при условии обеспечения точности формирования резьбовой поверхности ходового винта шарико-винтовых передач, необходимо выполнить оценку влияния технологических факторов на производительность процесса.

Ключевые слова: шарико-винтовая передача, профиль резьбы винта, методы формирования резьбы, шлифование резьбы.

Abstract

In the article was performed the analysis the existing methods of thread formation on screws ball-screw gears. It is shown that the methods of blade processing and plastic deformation make it possible to provide the required accuracy and surface roughness of the thread only on parts of non-hardened steels. The main method that provides the necessary accuracy of the profile and the quality of the thread surface on hardened parts is grinding, however, achieving the required surface quality is realized at a low intensity of metal removal. To increase the productivity of the grinding process, on condition to ensure the accuracy of forming the threaded surface of the lead screw of ball-screw gears, it is necessary to evaluate the impact of technological factors on the productivity of the process.

Keywords: ball screw transmission, the thread profile of the screw, methods of forming the thread, the grinding of the thread.

Введение. Исследования отечественных и зарубежных ученых показывают, что радиус профиля резьб оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики шарико-винтовых передач (ШВП): нагрузочную способность, жесткость, плавность работы и долговечность и поэтому к точности профиля резьбы предъявляют высокие требования (допуск на радиус профиля канавки 0,007...0,015 мм в зависимости от типоразмера). Однако даже при выполнении этих требований, изменения размеров резьбовой поверхности в

пределах поля допуска приводят к изменению нагрузочной способности передачи в 1,6 раза, ее жесткости в 1,4 раза и долговечности в 2,1 раза [1–6 и др.].

Постановка проблемы. Для обеспечения высокого качества функционирования передачи очень важно получить минимальное отклонение на всей длине винта таких параметров как момента холостого хода, изменения которого характеризуют плавность работы, и жесткости, от которой зависит точность перемещения и установки в требуемое положение рабочих органов станка. Поэтому особое внимание при изготовлении винтов и гаек уделяется обеспечению стабильности радиуса профиля резьбы. Как следует из технических требований, у винтов с шагом резьбы 10 мм изменения радиуса профиля не должны превышать 5 мкм, а у винтов с шагом резьбы 5 мм – 2,5 мкм. При выполнении этого условия расчетные поле рассеивания нагрузочной способности, жесткости и долговечности передачи не превышает 20% от их нормальных значений.

Высокие требования к нагрузочной способности и долговечности передач обуславливают необходимость в использовании для изготовления винтов и гаек высококачественных материалов, имеющих высокую контактную прочность и выносливость, таких как стали 9ХС, 8ХФ, ШХ15, ХВГ и др. с упрочнением рабочих участков резьбы до твердости HRC₃ 59..63. Приповерхностные дефекты, которые могут появиться в процессе обработки, приводят к ухудшению эксплуатационных свойств деталей и к дальнейшему ухудшению их долговечности [7-10 и др.]. Поэтому задачей технологического процесса является не только обеспечение точности и шероховатости резьбовой поверхности, но и сохранение качества металла поверхностного слоя, полученного при термоупрочнении.

Изложение основного материала. Резьбы винтов формируют в настоящее время следующими основными методами [11-17 и др.]: нарезание лезвийным инструментом; пластическим деформированием; шлифованием; электрохимическим шлифованием. Рассмотрим возможности этих методов с точки зрения обеспечения заданной точности и шероховатости поверхности резьбы.

Пластическое деформирование резьбы ходовых винтов качения осуществляется способом поперечно-винтовой прокатки [17-20 и др.], которая позволяет получать резьбы с точностью шага до 2 – 3 мкм, с точностью профиля, соответствующей точности профиля калибрующих витков накатных валков, и шероховатостью поверхности до $Ra=0,32 – 0,63$ мкм, и является более чем в 10 раз производительнее других методов формирования резьбы. Однако М.И. Писаревским показано, что область использования этого метода ограничивается твердостью металла заготовки $HRC \leq 36...39$ [17]. Поэтому способ поперечно-винтовой прокатки при изготовлении ходовых винтов качения применяется только при предварительном формировании резьбы до термоупрочнения заготовок.

Обработка резьбы лезвийным инструментом является наиболее распространенным и изученным методом образования резьбы. Он является в настоящее время основным при изготовлении винтов из незакаленных сталей и позволяет при высоком качестве заточки резца получить требуемое для ходовых винтов качения точность профиля и шероховатость поверхности резьбы [2, 3, 9, 18 и др.]. Однако, как установлено в работе Э.Н. Гулиды [21], при обработке резьбы незакаленных винтов твердосплавными резцами в течение 90...120 мин. износ по задней поверхности составляет 0,2...0,6 мм, что соответствует размерному износу резцов 0,05...0,16 мм. Так как изменения радиуса профиля резьбы на длине не должны превышать 5 мкм у винтов с шагом резьбы 10 мм, то стойкость резцов составляет всего 3...9 мин. При обработке среднего винта (~20 м резьбовой поверхности) инструмент необходимо менять после нескольких рабочих ходов.

С увеличением твердости обрабатываемого материала стойкость режущего инструмента уменьшается. Это объясняется более высокой истирающей способностью закаленных сталей [22] и приводит к увеличению износа резца. Исследованиями А.Д. Макарова [23] при обработке стали ХВГ установлено, что с увеличением твердости металла от HRC25 до

HRC65 износ реза увеличивается более чем в 16 раз. Это приводит к тому, что размерная стойкость реза при обработке резьбы ходовых винтов качения составляет менее одной минуты. Кроме того, обработка лезвийным инструментом не позволяет получить требуемую точность профиля и шероховатость поверхности резьбы винтов, т.к. в процессе резания наблюдаются значительные упругие и пластические деформации металла поверхностного слоя. А.Д. Макаровым установлена зависимость величины упругого восстановления поверхности резания t_y при обработке стали ХВГ от её твердости: $t_y=0.134(\text{HRC})^{1.1}$ мкм. Отсюда следует, что при увеличении твердости металла с HRC=25 до HRC=60 величина упругого восстановления металла увеличивается от 4,6 до 12,1 мкм. Так как величина упруго-пластических деформаций зависит от радиуса округления режущей кромки [7, 22], который по профилю реза неравномерен, то получить требуемую точность профиля и шероховатость поверхности резьбы практически невозможно. Работы [24-26 и др.], посвященные исследованию возможностей использования лезвийной обработки для прорезки резьбы в закаленных заготовках, показали, что ее целесообразно применять лишь на предварительных операциях взамен шлифования одноконтурными кругами.

Промышленный опыт и многочисленные исследования [25-29 и др.] показывают, что требуемые точность и шероховатость поверхности резьбы закаленных винтов качения в настоящее время обеспечиваются способами абразивной обработки. На финишных операциях формирования резьбы с шероховатостью поверхности $Ra \leq 0.63$ мкм применяется шлифование – наиболее производительный способ абразивной обработки. При более высоких требованиях к шероховатости поверхности после финишного шлифования вводится операция микродоводки, которая, не меняя формы профиля резьбы, позволяет уменьшить микронеровностей до $Ra=0,16 \dots 0,32$ мкм.

Шлифование, благодаря малым радиусам закругления вершин абразивных зерен, наличию на них острых граней микровыступов, позволяет резко уменьшить величину упругопластических деформаций поверхностного слоя заготовки по сравнению с лезвийной обработкой. В результате профиль обработанной поверхности соответствует производящей поверхности абразивного круга. Шлифование резьбы ходовых винтов осуществляется одно- и многоконтурными кругами. Обработка одноконтурными кругами [30, 31], благодаря малым тепловым и силовым воздействиям на заготовку, позволяет получить высокую точность и качество поверхности резьбы. Однако этот способ формирования резьбы характеризуется низкой производительностью, быстрым износом кругов, увеличенными затратами времени на их правку, замену и балансировку, приходящимися на одну заготовку. В работах [16, 31-33 и др.] повышение производительности шлифования резьбы предлагается осуществлять за счет увеличения числа ниток круга. При этом производительность по сравнению с одноконтурным шлифованием увеличивается пропорционально числу ниток круга, а число правок и время на замену изношенного круга, приходящихся на одну деталь, уменьшается. Основным недостатком процесса обработки резьбы винтов многоконтурными кругами является низкая точность шага резьбы из-за больших тепловых деформаций винтов [34, 35]. Поэтому шлифование многоконтурными кругами используется на предварительных операциях, а одноконтурными – при окончательном формировании резьбы ходовых винтов. Следует отметить важное достоинство обработки профильных поверхностей шлифованием по сравнению с другими методами – это быстрое восстановление потерянной точности профиля круга путем его правки. Современные резьбошлифовальные станки позволяют осуществлять правку круга во время холостых ходов, в результате чего уменьшается трудоемкость изготовления винта.

Шлифование резьбы ходовых винтов имеет особенности, обусловленные большой длиной резьбовой канавки, от которых зависят точность и качество резьбовой поверхности. В процессе обработки в результате трения, силовых и тепловых воздействий абразивные зерна изнашиваются, приводя к изменению размера обрабатываемой заготовки. Исследованию износа абразивных кругов посвящены работы Маслова Е.Н., Лурье Г.Б., Филимонова Л.Н. и других ученых [36-39 и др.]. Результаты этих исследований показывают четкую связь износа

круга от интенсивности съема металла и позволяют определить режимы шлифования, обеспечивающие требуемую точность профиля круга. По данным Г.Б. Лурье [37] при шлифовании конструкционных сталей кругами из электрокорунда удельный износ кругов равен $0,01...0,04 \text{ мм}^3/\text{мм}^3$. Л.Н. Филимоновым [38] при чистовом шлифовании закаленных сталей кругами 24А зернистостью F54...F90/80 и твердостью K...O установлено, что удельный износ составляет $0,015...0,04 \text{ мм}^3/\text{мм}^3$. Используя эти данные и приняв допускаемый размерный износ круга равным 5 мкм, получим, что обработку резьбы «среднего» винта (~20 м пути шлифования) необходимо производить при глубине резания менее 0,01 мм. Это значение допускаемой глубины резания совпадает с рекомендуемым на последнем переходе операции финишного шлифования в производстве ходовых винтов качения [9, 13, 23]. В то же время глубина резания при бесприжоговом шлифовании резьбы ходовых винтов качения составляет 0,11...0,12 мм [40-43]. Следовательно, для обеспечения необходимой точности профиля резьбы приходится снижать производительность обработки более чем в 10 раз.

В работах [32, 44, 45] в качестве перспективного метода формирования резьбы в сплавах повышенной твердости (более HRC45) предлагается электрохимическое шлифование. Стойкость круга при использовании этого метода увеличивается в 2...10 раз [46] (по данным работы [25] – в 8...12 раз), т.к. в результате микрорезания удаляется лишь 10...15% всего количества металла, а остальная часть – за счет электрохимического растворения [25, 36]. Поэтому получение требуемой точности профиля резьбы в этом случае облегчается. Кроме того, исключается возможность появления шлифовочных прижогов и трещин на поверхности детали. Однако сведения о применении электрохимического шлифования при изготовлении ходовых винтов, оборудовании и инструменте, а также рекомендации по введению процесса практически отсутствуют.

Заключение. Выполненный анализ методов формирования резьбы для шарико-винтовых передач показывает, что высокопроизводительные способы лезвийной обработки и пластического деформирования позволяют обеспечить требуемую точность и шероховатость поверхности резьбы только на деталях из незакаленных сталей. Основным методом, обеспечивающим необходимую точность профиля и качества поверхности резьбы на закаленных деталях, является шлифование. При использовании этого метода, достижение требуемой точности профиля и качества поверхности резьбы реализуется с учетом интенсивности съема металла, допустимой из условия бездефектного шлифования (интенсивность съема металла снижается более чем в 10 раз).

Для повышения производительности процесса шлифования при условии обеспечения точности формирования резьбовой поверхности ходового винта шарико-винтовых передач, необходимо выполнить оценку влияния технологических факторов на производительность процесса.

Литература

1. Леликов О.П. Шариковые винтовые передачи (продолжение). Приложение к журналу «Справочник. Инженерный журнал», №2. – М.: Машиностроение, 2003. – 28 с.
2. Знаиоров Б.М., Васин А.Н. Технологическое обеспечение надежности передач ВГК. //В сб. Прогрессивные направления развития технологии машиностроения. – Саратов: СГТУ, 1996. – С. 18–21.
3. Збарский Ю.Ш., Фомкин В.Г., Шкапенюк М.Б. Влияние погрешностей изготовления на жесткость передач винт-гайка качения // Металлорежущие станки, Вып.4. – Киев, 1976. – С. 25–32.
4. Du Z., Zhang X-L., Tao T. Study of the dynamic characteristics of ball screw with a load disturbance // Mathematical Problems in Engineering. Vol. 1, 2016. P. 1-10 <https://doi.org/10.1155/2016/8208241>.

5. *Назин В.И.* Проектирование механизмов с передачей винт-гайка. – Харьков: ХАИ, 2006. – 123 с.
6. Xu N., Tang W., Chen Y., Guo Y. Modeling analysis and experimental study for the friction of a ball screw // *Mechanism and Machine Theory*. Vol. 87, 2015. P. 57-69. DOI: [10.1016/j.mechmachtheory.2014.12.019](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.12.019).
7. Инженерия поверхности деталей. Под ред. *Суслова А.Г.* – М: Машиностроение, 2008. – 320 с.
8. *Безъязычный В.Ф.* Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин // *Инженерный журнал*. № 4, 2001. С. 9–16.
9. M'Saoubi R., Outeiro J.C., Chandrasekaran H., et al.. A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products // *Int. J. Sustainable Manufacturing*. Vol. 1, No. 1/2, 2008. P. 203-236.
10. Zeng Q., Wenlong Y.Q., Luo C.X. Correlating and evaluating the functionality-related properties with surface texture parameters and specific characteristics of machined components // *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 149, 2018. P. 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.09.044>.
11. Прецизионные катаные шариковинтовые передачи. [Электр. ресурс], <https://technobearing.ru/d/877366/d/pretsizionnyyekatanyyesharikovintovyepperedachi.pdf> – Дата обращения: 12.01.2020.
12. *Москалюк Р.Ю.* Формализация целей и критериев проектирования процесса накатывания винтов для шариковых винтовых передач // *Труды Одесского политехнического университета*. – №2 (28). – 2007. – С. 285–288.
13. *Кальченко В.В., Ерошенко А.М.* Шлифование винтовых поверхностей со скрещивающимися осями инструмента и детали с круговым профилем. // *Машинобудування. Збірник наукових праць*. Вып. 3, 2008. – Харків: Українська інженерно-педагогічна академія, С. 129-138.
14. *Русавский Ю. П., Соболева Н.В., Шкапенюк М.Б.* Технология производства шариковых передач винт–гайка качения. – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.
15. Hassan El-Hofy. *Fundamentals of Machining Processes. Conventional and Nonconventional Processes*. CRC Press Publ, 2006. – 552 p.
16. *Modern machining technology. A practical guide*. Ed. J. Paulo Davim. Woodhead Publ., 2011. 412 p.
17. *Писаревский М.И.* Накатывание точных резьб, шлицев и зубьев. – Л.: Машиностроение, 1973. – 200 с.
18. Tschaetsch H., Reichenhall B. *Metal Forming Practise. Processes-Machines-Tools*. Springer-Verlag Berlin, 2006. – 405 p.
19. Pater Z., Surdacki P., Weroński W. New method of thread rolling // *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 153 (1), 2004. P. 722-728 DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.154.
20. *Лукичев В.Ф., Эстерзон М.А., Байков А.Н.* Изготовление винтов качения с накатанным профилем резьбы.// *Станки и инструмент*. №12, 1979. С. 12-14.
21. *Гулида Э.Н.* Теория резания металлов, металлорежущие станки и инструменты. – Львов: Вища школа, 1976. – 334 с.
22. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
23. *Макаров А.Д.* Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
24. *Крюковских Н.Д.* Особенности изготовления передач винт–гайка качения. // *Станки и инструмент*. – №8. – 1970. – С. 24–26.
25. *Технология механической обработки и сборки в прецизионном станкостроении. Под ред. М.О. Яковсона*. – М.: Машиностроение, 1970. – 320 с.

26. Darshith. S., Babu K.R., Manjunath S.S. Comprehensive study of cut and roll threads // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. Vol. 11, Iss.2, 2014. P. 91-96.
27. *Кондратьев С.Б.* Технология изготовления винтовых пар качения. – М.: Машиностроение, 1972. – 31 с.
28. M'Saoubi R., Outeiro J.C., Chandrasekaran H., Dillon O.W., Jawahir I.S. A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products // Int. J. Sustainable Manufacturing. Vol. 1, №. 1/2, 2008. P. 203-236.
29. Holmes C. Developments in the productive grinding of screw rotors and other helical parts in response to user feedback // 7th International Conference on Compressors and their Systems 2011. P. 337-343. [DOI: 10.1533/9780857095350.7.337](https://doi.org/10.1533/9780857095350.7.337).
30. *Боголюбов Ю.В.* Исследование точности шлифования резьбы ходовых винтов скольжения. Дисс. канд. техн. наук. – М.: 1981. – 192 с.
31. *Соболева Н.В.* Исследование технологических возможностей повышения производительности обработки резьбы ходовых винтов качения длиной до 2500мм. Дисс. канд. техн. наук. – М. – Одесса, 1981. – 209 с.
32. Marinescu Ioan D. Handbook of machining with grinding wheels. CRC Press Publ., 2016. – 723 p.
33. *Курдюков В.И.* Основы абразивной обработки. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2014. – 195 с.
34. Malkin S, Guo C. Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives. Industrial Press Publ., 2008. – 369 p.
35. *Русавский Ю.П.* Исследование тепловых явлений при резьбошлифовании и разработка технологических предпосылок для управления качеством поверхностного слоя резьбы ходовых винтов. Дисс. канд. техн. наук. – Одесса, 1983. – 216 с.
36. *Маслов Е.Н.* Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
37. *Лурье Г.Б.* Шлифование металлов. М.: Машиностроение, 1969. – 172 с.
38. *Филимонов Л.Н.* Стойкость шлифовальных кругов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 136 с.
39. *Богущий В.Б., Шрон Л.Б.* Изменение характеристик рабочей поверхности шлифовального круга за период его стойкости // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – Т. 19. – № 2. – 2019. – С. 66–74.
40. *Ларшин В.П., Дьячкова Е.А., Ларшина А.В.* Бесприжоговое шлифование резьбы ходовых винтов // Труды Одесского политехнического университета. – № 1. – 2008. – С. 81–85.
41. *Солер Я.И., Казимиров Д.Ю., Нгуен В.Л.* Выбор абразивных кругов по прижогам закаленных деталей с использованием цифровых технологий // Вектор науки ТГУ. – № 2 (32-2). – 2015. – С. 176–184.
42. *Якимов А.В., Новиков Ф.В., Якимов А.А.* Высокопроизводительная обработка абразивно–алмазными инструментами. – К.: Техника, 1993. – 152 с.
43. *Калинин Е.П.* Научные основы интенсивного неприжогового шлифования сталей и сплавов с учетом степени затупления инструмента. Автореферат дис...д-ра техн. наук. – СПб., 1995. – 31 с.
44. *Полянчиков Ю.Н., Схиртладзе А.Г., Воронцова А.Н., и др.* Электрохимические и электрофизические методы обработки в современном машиностроении. Волгоград: ВолгГТУ, 2015. – 240 с.
45. DeVries W. R. Analysis of Material Removal Processes. Springer-Verlag, 1992. – 269 p.
46. *Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. Под ред. А. Н. Резникова.* – М.: Машиностроение, 1977. – 391с.