

Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2025. №1 (163). С.9-16.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №1 (163). P.9-16.

Научная статья
УДК: 621.83
doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-9-16

Применение металлофизических методов аттестации материалов роликвинтовой передачи

Галина Валерьевна Иванова¹, с.н.с
Галина Викторовна Цветкова², к.т.н.
Елена Александровна Тарасенко³, к.т.н.
Марк Геннадьевич Евсин⁴, к.т.н.

^{1, 2, 3, 4} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

¹ galura@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-5069-2060>

² tsvetkova_gv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5774-2609>

³ taraselen@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ mark.evsin1995@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2403-9386>

Аннотация. Работа посвящена выбору методов определения материалов, применяемых для изготовления роликвинтовой передачи в рамках импортозамещения. Использовались современные методы исследования – оптическая и растровая электронная микроскопия, измерения микротвердости с применением автоматического микротвердомера. В результате измерения микротвердости материала роликвинтовой передачи было получено ее увеличение от 779HV в центре до 835 HV на зубьях детали. На основе проведенных металлографических исследований получена микроструктура мелкоигльчатого мартенсита с ярко выраженными цепочками карбидов хрома, молибдена, ванадия с микротвердостью 1200...1500 HV. При использовании микрорентгеноспектрального анализа с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN LYRA 3 с системой микроанализа Ultim MAX была получена информация о точечном химическом составе материала образца, наблюдались следы выпадения карбидов из матрицы с низкими вязко-пластичными свойствами. Даны рекомендации о подходящих отечественных материалах-аналогах. Результаты исследований могут быть использованы в конструктивных решениях по проектированию и модернизации машин и механизмов.

Ключевые слова: ролик, роликвинтовая передача, линейный привод, микротвердость, химический состав, микроструктура

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>.

Для цитирования: Иванова Г.В., Цветкова Г.В., Тарасенко Е.А., Евсин М.Г. Применение металлофизических методов аттестации материалов роликвинтовой передачи // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 1 (163). С. 9–16. doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-9-16

Application of metallophysical methods of certification of roller drive materials

Galina V. Ivanova¹, SRF
Galina V. Tsvetkova², PhD Eng.
Elena A. Tarasenko³, PhD Eng.
Mark G. Evsin⁴, PhD Eng.

^{1, 2, 3, 4} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

¹ galura@yandex.ru

² tsvetkova_gv@mail.ru

³ taraselen@mail.ru

⁴ mark.evsin1995@yandex.ru

Abstract. The paper is devoted to the selection of methods for determining the materials used for the manufacture of roller drive in the framework of import substitution. Modern research methods were used such as optical and scanning electron microscopy, microhardness measurements using an automatic microhardness tester. As a result of measuring the microhardness of the roller drive material, the authors obtained an increase from 779HV in the center to 835HV on the teeth of the part. Based on metallographic studies, the microstructure of fine-needled martensite with well-defined chains of chromium, molybdenum, and vanadium carbides with a microhardness of 1200...1500 HV has been obtained. In case of microrentgenospectral analysis using a TESCAN LYRA 3 scanning electron microscope with the Ultim MAX microanalysis system, information was obtained on the point chemical composition of the sample material, traces of precipitation of carbides from a matrix with low visco-plastic

properties were observed. Recommendations are given on suitable domestic analog materials. The research results can be used in constructive solutions for the design and modernization of machines and mechanisms.

Keywords: roller, roller drive, linear actuator, microhardness, chemical composition, microstructure

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>.

For citation: Ivanova G.V., Tsvetkova G.V., Tarasenko E.A., Eysin M.G. Application of metallophysical methods of certification of roller drive materials / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 1 (163). P. 9–16. doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-9-16

Введение

Роликовинтовая передача – это механизм, использующийся для преобразования вращения входного вала в возвратно-поступательное движение выходного звена, например, штока. Она состоит из роликов, которые расположены между двумя резьбовыми поверхностями выполняющими, по своей сути роль винта и гайки. За счет замены скольжения качением достигается значительное снижение сил трения при сохранении высокой нагрузочной способности. Такая особенность роликовинтовых передач позволила использовать их в линейных электромеханических приводах (рис. 1), которые приходят на смену классическим гидро- и пневмоприводам [1]. Основными преимуществами электромеханических приводов являются: повышение качества позиционирования, повышение энергоэффективности, снижение эксплуатационных расходов, отсутствие утечек рабочей жидкости, повышение надежности за счет уменьшения количества компонентов системы [2].

К областям применения роликовинтовых передач и приводов на их основе относятся: машиностроение, например, робототехника, высокоточные станки с числовым программным управлением, электрическая строительная техника, авиационная и космическая промышленность, энергетика и др. [4 – 5].



Рис. 1. Линейный электромеханический привод [3]

Fig. 1. Linear electromechanical drive [3]

Ограничением для увеличения объема применения роликовинтовых передач является

сложность технологического процесса их производства, с учетом сложной формы поверхностей тел качения и высоких требований к характеристикам используемого материала. Для обеспечения максимального ресурса изделия необходимо достижение высокой твердости и низкой шероховатости поверхностей трения. Обеспечение данных показателей обычно достигается термической обработкой с последующей обработкой шлифованием. Существуют различные методы термообработки заготовок, например, объемная закалка, закалка токами высокой частоты, цементация, азотирование и др. Известна научная работа, выполненная компанией «Диаконт», в которой рассматривается применение азотирования для изготовления элементов роликовинтовой передачи [6]. Азотирование поверхности подходит для усовершенствования технических параметров углеродистых и легированных сталей, содержащих углерод в концентрации 0,3...0,5 % включительно [7]. Получаемая микроструктура поверхностного слоя изделия, насыщенная азотом, содержит растворённые нитриды и приобретает повышенную коррозионную стойкость и высокую микротвёрдость, но и высокую хрупкость поверхностного слоя, что снижает качество и производительность обработки [8, 9]. Кроме того, это длительная и дорогостоящая операция.

Также в отечественной промышленности активно применялись приводы зарубежного производства, выпускаемые компанией Exlar. Привод, частью которого являлась данная передача, применялся в системе регулирования паровой турбины. Учитывая, что поставка зарубежной продукции в текущей политико-экономической ситуации не представляется возможной, актуально и целесообразно изучить и перенять подходящий опыт зарубежных коллег в части выбора материалов и методов термообработки компонентов роликовинтовых передач.

Таким образом целью исследования является выбор материала для изготовления роликов планетарной роликовинтовой передачи.

Материалы и методы

Объектом исследования являлся материал ролика (рис. 2), использовавшегося в

планетарной роликвинтовой передаче, произведенный компанией Exlar. В работе был рассмотрен материал сталь с содержанием углерода около 1 %.

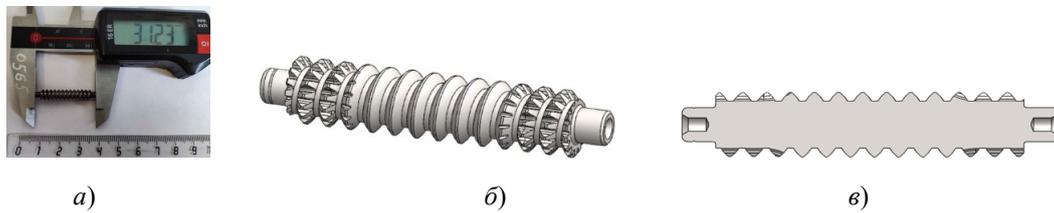


Рис. 2. Исследованный образец:

a – внешний вид образца; *б* – трехмерная модель ролика по геометрическим параметрам; *в* – трехмерная модель ролика в разрезе

Fig. 2. The studied sample:

a – Physical configuration of the sample; *b* – a three-dimensional model of the roller according to geometric parameters; *c* – a three-dimensional model of the roller in the section

Для металлографических исследований материала, ролик был разрезан электроэрозионным методом на две части вдоль оси. Первый образец (половина детали) использовался для измерения геометрических параметров образца. Второй образец – для изготовления шлифов, измерения микротвердости, определения содержания углерода и точечного химического состава материала. Для проведения металлографических исследований образцы материала были химически протравлены 4 % раствором азотной кислоты в спирте. Анализ условного размера зерна был проведен по стандартной методике ASTM E1382 – 97, ASTM E112.

Для более точного определения содержания углерода в образце материала был проведен общий анализ путем сжигания пробы

материала. Содержание углерода 1,08 %, содержание серы 0,0004 %.

Для определения микротвердости материала использовался автоматический микротвердомер FM-300. Микрорентгеноспектральный анализ проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN LYRA 3 с системой микроанализа Ultim MAX.

Эксперимент

В результате измерения микротвердости образца материала получено распределение микротвердости, среднее значение по образцу равно 779 HV, а вблизи зубчатой части ролика микротвердость выше и в среднем составляет 835 HV, (рис. 3, табл. 1).

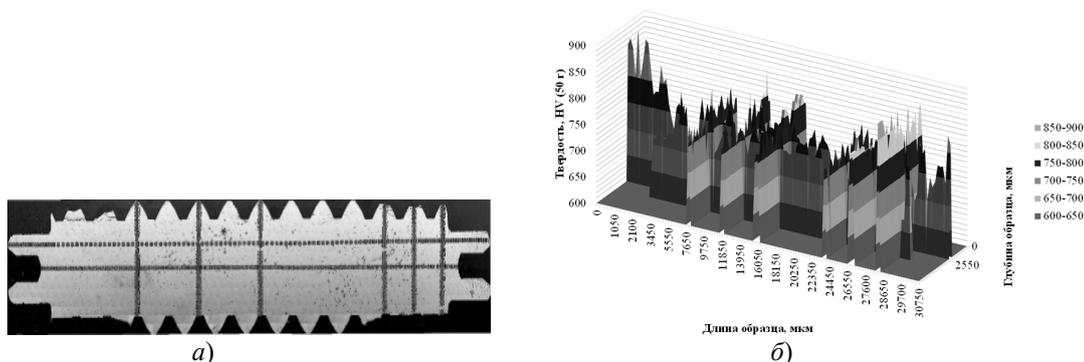


Рис. 3. Распределение микротвердости по материалу образца (8 дорожек):

a – панорама образца с нанесенными точками измерений; *б* – график распределение микротвердости

Fig. 3. Microhardness distribution over the sample material (8 tracks):

a – panorama of the sample with the measurement points plotted; *b* – graph of microhardness distribution

1. Микротвердость материала ролика

1. Microhardness of the roller material

Значения	Номер дорожки образца							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Среднее значение HV (50 г)	767	782	786	773	789	835	754	739
Стандартное отклонение	20,4	25,6	21,7	21,3	17,5	39,3	51,6	38,8
Доверительный интервал (95 %)	7,33	9,2	7,93	7,77	6,51	14,6	9,27	8,22
Относительная точность, %	0,96	1,18	1,01	1,01	0,83	1,75	1,23	1,11
Размах значений	96,7	107	78,2	110	77,4	178	309	209

При проведении металлографических исследований удалось определить микроструктуру материала (рис. 4, *a – в*), а также границы, формы и размеры зерен и включений (рис. 4, *д, е*). Микроструктура представляет собой мелкоугольчатый мартенсит, включающий

в себя карбиды, которые можно видеть на не травленной поверхности (рис. 4, *з*).

Средний диаметр зерна составил 3...4 мкм, что говорит о мелкозернистой структуре материала.

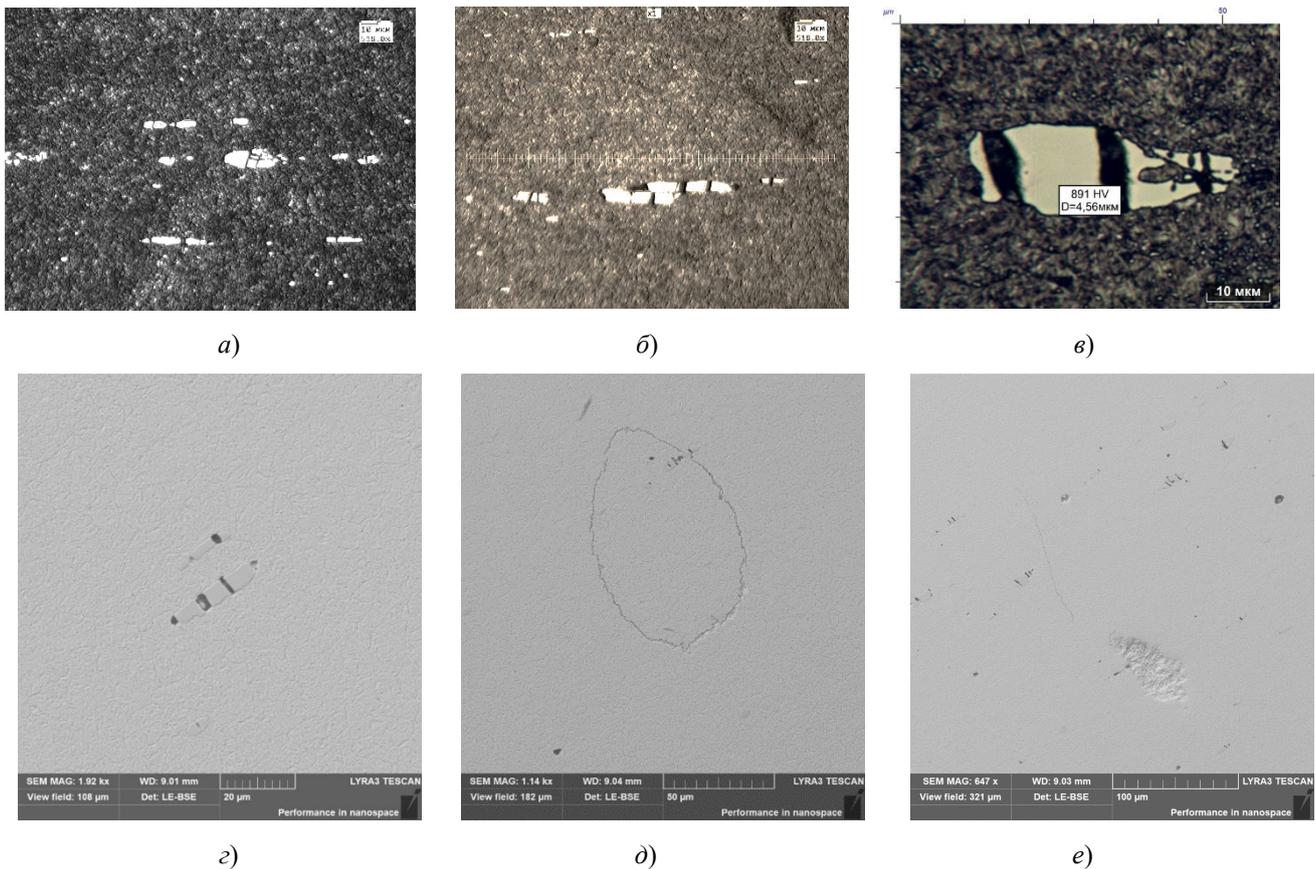


Рис. 4. Микроструктура поверхности образца:

a, б – изображения микроструктуры поверхности образца с карбидами; *в* – изображения микроструктуры и значения микротвердости карбидов; *г, д, е* – панорама поверхности с кавернами после выпавших включений

Fig. 4. Microstructure of the sample surface:

a, b – images of the microstructure of the sample surface with carbides; *c* – images of the microstructure and microhardness values of carbides; *d, e, f* – panorama of the surface with cavities after the fallen inclusions

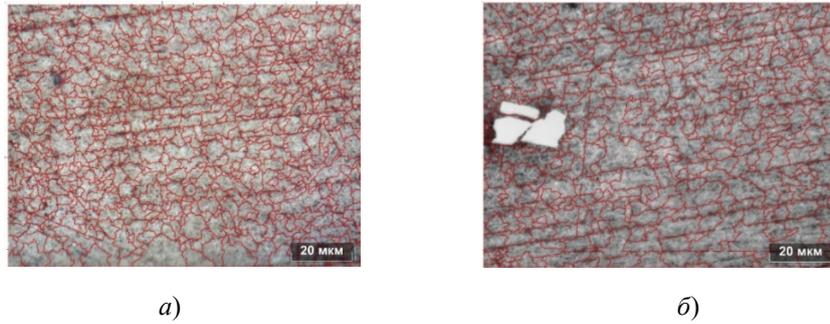


Рис. 5. Снимки поверхности образца (а) с сеткой для определения размера зерна (б)

Fig. 5. Sample surface images (a) with a grid for determining grain size (b)

3. Размеры зерен

3. Grain sizes

Величина	Значение	
	рис. 5, а	рис. 5, б
Общее количество измеренных зерен, n	443	703
Количество зерен на 1 мм^2 , m	45216	71753
Средняя площадь зерна, $a \text{ мм}^2$	0,000022 (22 мкм ²)	0,000014 (14 мкм ²)
Стандартное отклонение, s	24,3	13,8
95% доверительный интервал, 95% CI	2,31	1,04
Относительная точность, % RA	10,4	7,5
Номер зерна, G	12,51	13,18
Средний условный размер зерна, l	4,19 мкм	3,33 мкм

При проведении микрорентгеноспектрального анализа с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN LYRA 3 с системой микроанализа Ultim MAX была получена информация о точечном химическом составе материала образца. Химический состав однороден по всему образцу, дополнительно исследованы выступающие рельефные карбиды и черные включения (табл. 4). Были

проведены исследования черных включений на поверхности образца, которые при выпадении образуют каверны, края неровные в мелких трещинах, это может говорить о том, что карбиды выпали из матрицы мелкоугольчатого мартенсита, который обладает высокой твердостью и слабыми вязкими свойствами, т. е. матрица не может удержать карбиды.

4. Содержание химических элементов в материале, в процентах

4. The content of chemical elements in the material, in percentage terms

Элементы	Поверхность	Карбиды	Черные включения
Si	0,4	0,1	0,3
V	0,2	4,3	0,9
Cr	5,8	42,2	16,3
Mn	0,8	1,0	0,9
Fe	91,5	46,8	79,1
Ni	0,0	0,1	0,1
Mo	1,2	5,4	2,3
W	0,1	0,2	0,0

Обсуждение результатов

Опираясь на результаты, полученные при исследовании зарубежного образца, можно сделать вывод о целесообразности применения отечественного материала с аналогичными химическим составом и свойствами.

Исходя из микроструктуры материала образца и полученной микротвердости, можем рассмотреть сталь инструментальную быстрорежущую марки P18. Основное свойство этой стали высокая теплостойкость, которая обеспечивается введением вольфрама и других карбидообразующих элементов-хрома, молибдена, ванадия. В результате легирования инструменты из таких сталей сохраняют высокую твердость, допускают более производительные режимы резания, чем из углеродистых и низколегированных сталей. Микроструктура быстрорежущей стали марки P18 после окончательной термической обработки может быть следующей (рис. 6, а, б): мартенсит отпуска и первичные карбиды [10]. После выдержки при температуре 1230 °С в течение 2 мин, охлаждения в воде, отпуска при 500 °С два раза по 1 ч, охлаждении в воде, получается твердость 841HV.

При этом в микроструктуре несколько крупных частиц расположены цепочками. Температура отпуска лежит в районе вторичного твердения. Очень мелкодисперсные выделения вызывают потемнение структуры. Расположение карбидов ванадия указывает на ориентацию исходных мартенситных игл. Карбиды ванадия настолько мелки, что невозможно судить об их форме. Светлые и круглые частицы соответствуют карбидам типа Me_6C . Для уменьшения карбидной неоднородности и улучшения эксплуатационной стойкости материалов рекомендовано использование порошковых технологий.

При сравнении химического состава исследуемого материала (содержание углерода 1,08 %), со справочными данными было выявлено, что ближайшими из широко применимых аналогов могут быть подшипниковые стали (табл. 5). Микроструктура материала исследованного образца аналогична микроструктуре шарикоподшипниковой стали ШХ15 после закалки с низким отпуском (рис. 6, в), с микроструктурой, состоящей из мартенсита игольчатого с частицами карбидов [10].

5. Химический состав сплавов

5. Chemical composition of alloys

Элементы	9Х5ВФ	Х6ВФ	P18	ШХ15
Si	0,1...0,4	0,15...0,35	0,2...0,5	0,17...0,37
V	0,15...0,3	0,5...0,8	1...1,4	0,17...0,37
Cr	4,5...5,5	5,5...6,5	3,8...4,4	1,3...1,65
Mn	0,15...0,4	0,15...0,4	до 0,5	0,2...0,4
Fe	от 90,4	остальное	остальное	остальное
Mo	–	до 0,3	до 1,0	–
W	0,8...1,2	1,1...1,5	17...18,5	–
Ni	–	до 0,35	до 0,4	до 0,3
C	0,85...1	1,05...1,15	0,73... 0,83	0,95...1,05
S	до 0,03	до 0,03	до 0,03	до 0,02
P	до 0,03	до 0,03	до 0,4	до 0,027
Cu	–	до 0,3	–	до 0,25
Co	–	–	до 0,5	–

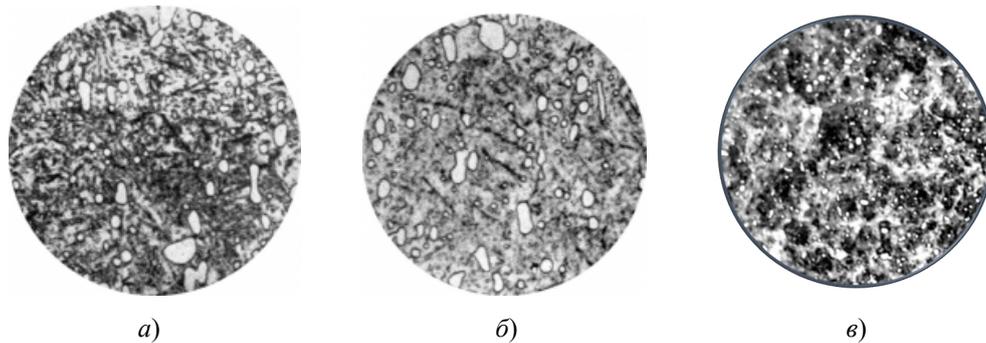


Рис. 6. Структура схожих марок сталей:

a, б – сталь P18 после отпуска; *в* – сталь ШХ15 после закалки с низким отпуском, увеличение $\times 1000$

Fig. 6. The structure of similar grades of steels:

a, b – HSS 18 after temper; *c* – roller-bearing steel Cr15 after quenching with low tempering, an increase of $\times 1000$

Так близким материалом, имеющим структуру мелкоигольчатого мартенсита с включениями карбидов, является подшипниковая сталь ШХ15, для которой характерны высокая твердость, износостойкость, сопротивление контактной усталости в сочетании с хорошей вязкостью после сложной термической обработки (закалка с температуры $840\dots 860\text{ }^{\circ}\text{C}$ в масло, нагретое до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, отпуск при $150\dots 170\text{ }^{\circ}\text{C}$). Эти выгодные нам свойства позволяют рекомендовать сталь ШХ15 в качестве аналога зарубежного материала ролика.

Исходя из химического состава исследованного образца, в качестве материала – заменителя могут быть использованы сталь инструментальная легированная 9Х5ВФ и сталь инструментальная штамповая Х6ВФ. При сравнении микроструктуры материала образца с упомянутыми сталями при оценке карбидной неоднородности отожженных образцов стали видим соответствие со шкалой 2 ГОСТ 5950-2000, т. е. слабо выраженная полоччатость, тонкие строчки карбидов. Эти стали подходят по твердости и механическим свойствам, используются для изготовления ножей, инструмента для холодной деформации.

Заключение

Таким образом, в результате использования металлофизических методов аттестации металлических материалов предложены подходы к решению проблемы выбора отечественных материалов для изготовления ролика роликвинтовой передачи в рамках импортозамещения.

Применялись экспериментальный и аналитический методы выбора материалов с

требуемыми характеристиками. При выборе материала были использованы заданные нами определенные требования к самому материалу. Затем эти требования мы сравнили со свойствами материалов, известными из литературных источников или полученными в результате испытаний. В итоге были отобраны материалы, удовлетворяющие всем сформулированным требованиям.

В результате исследования получили следующие критерии: химический состав исследуемого материала (содержание углерода 1,08 %, что сразу исключает применение азотирования), микроструктуру материала образца (мелкоигольчатый мартенсит с включениями карбидов), а также микротвердость (среднее значение 779 HV, вблизи зубчатой части ролика микротвердость составляет 835 HV). Для дальнейшей разработки изготовления роликов роликвинтовой передачи были выбраны наиболее перспективные следующие отечественные материалы: после соответствующей термической обработки требуемые свойства могут показать быстрорежущая сталь P18, подшипниковая сталь ШХ15, инструментальная легированная сталь 9Х5ВФ и инструментальная штамповая сталь Х6ВФ.

Практическая значимость работы состоит в предложенном методе подбора отечественного материала вместо зарубежного с подходящими по микротвердости, микроструктуре, химическому составу и свойствам. Материалы статьи будут полезными в области машиностроения, например, в электрической строительной технике, авиационной и космической промышленности, энергетике и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексанин С.А. и др. Перспективы развития технологии и рынка приводных решений: куда движется привод // Современные технологии управления. 2013. №. 11 (35). С. 1–12.
2. Уваров М.М., Магдиев Р.Р. Алгоритм обработки технологии изготовления детали роликвинтовой передачи на токарном автомате «Швейцарского» типа // Металлообработка. 2014. №. 4 (82). С. 45–49.
3. Электромеханические приводы [Электронный ресурс] URL: <https://szd-e.ru/elektromekhanicheskie-privody-emp/> (дата обращения 06.10.2024).
4. Промышленность – Exlar [Электронный ресурс] URL: <https://www.cw-actuation.com/en-gb/industries> (дата обращения 06.10.2024).
5. Роликвинтовые передачи SKF каталог [Электронный ресурс] URL: https://avsnab.ru/uploads/manufacturer_document/file/699/PBII_SKF.pdf (дата обращения 06.10.2024).
6. Иваненко А.О., Тулькова И.А., Уваров М.М. Технологические особенности азотирования резьбовых поверхностей ответственных деталей электромеханического привода // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61. №. 4. С. 360–367.
7. Husson R. et al. Consideration of residual stress and geometry during heat treatment to decrease shaft bending // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Т. 72. С. 1455–1463.
8. Куksenova Л.И., Алексеева М.С., Козлов Д.А. Зависимость показателей эксплуатационных свойств азотированных сталей от структурного состояния поверхностного слоя // Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. № 3 (141). С. 23–37. DOI 10.30987/2223-4608-2023-23-37. EDN BRVZVU.
9. Петрова Л.Г., Белашова И.С. Газоциклические процессы химико-термической обработки: регулирование строения азотированного слоя в железе и сталях // Научно-технические технологии в машиностроении. 2024. № 7 (157). С. 3–14. DOI 10.30987/2223-4608-2024-3-14. EDN SOPPKT.
10. Атлас микроструктур черных и цветных металлов и сплавов: учебное наглядное пособие для студентов вузов группы специальностей 74 06 Агроинженерия / БГАТУ, Кафедра технологии металлов; [сост.: А. А. Андрушевич и др.]. Минск, 2012. 97 с.
11. Сталь инструментальная быстрорежущая [Электронный ресурс] URL: <https://markmet.ru/strukturi-stalei/386> (дата обращения 21.10.2024).

REFERENCES

1. Aleksanin S.A. et al. Prospects for the development of technology and the market for drive solutions: where is the drive heading // Modern control technologies. 2013. No. 11 (35). P. 1–12.
2. Uvarov M.M., Magdiev R.R. Algorithm for developing the technology for manufacturing a roller-screw transmission part on a Swiss-type lathe // Metalworking. 2014. No. 4 (82). P. 45–49.
3. Electromechanical drives [Electronic resource] URL: <https://szd-e.ru/elektromekhanicheskie-privody-emp/> (accessed 06.10.2024).
4. Industry – Exlar [Electronic resource] URL: <https://www.cw-actuation.com/en-gb/industries> (date of access 06.10.2024).
5. Roller screw drives SKF catalog [Electronic resource] URL: https://avsnab.ru/uploads/manufacturer_document/file/699/PBII_SKF.pdf (date of access 06.10.2024).
6. Ivanenko A.O., Tulkova I.A., Uvarov M.M. Technological features of nitriding of threaded surfaces of critical parts of an electromechanical drive // Bulletin of higher educational institutions. Instrument engineering. 2018. Vol. 61. No. 4. P. 360–367.
7. Husson R. et al. Consideration of residual stress and geometry during heat treatment to decrease shaft bending // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 72. Pp. 1455–1463.
8. Kuksenova L.I., Alekseeva M.S., Kozlov D.A. Dependence of performance indicators of nitrided steels on the structural state of the surface layer // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. No. 3 (141). Pp. 23–37. DOI 10.30987/2223-4608-2023-23-37. EDN BRVZVU.
9. Petrova L.G., Belashova I.S. Gas-cyclic processes of chemical-thermal treatment: regulation of the structure of the nitrided layer in iron and steels // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. No. 7 (157). P. 3–14. DOI 10.30987/2223-4608-2024-3-14. EDN SOPPKT.
10. Atlas of microstructures of ferrous and non-ferrous metals and alloys: a teaching aid for university students of the group of specialties 74 06 Agroengineering / BSATU, Department of Metal Technology; [compiled by: A. A. Andrushevich et al.]. Minsk, 2012. 97 p.
11. High-speed tool steel [Electronic resource] URL: <https://markmet.ru/strukturi-stalei/386> (date of access 10/21/2024).

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.11.2024; одобрена после рецензирования 30.11.2024; принята к публикации 12.12.2024.

The article was submitted 10.11.2024; approved after reviewing 30.11.2024; assepted for publication 12.12.2024.