



МАГНИТНАЯ ВИНТОВАЯ ПАРА

MAGNETIC LEAD SCREW

УДК 621.9, ВАК 05.02.07, DOI: 10.22184/1993-8578.2017.77.6.66.75

К.Индугаев¹, П.Осипов¹, Ю.Белов^{2,3}, И.Яминский^{2,3} / yaminsky@nanoscopy.ru
K.Indukaev¹, P.Osipov¹, Yu.Belov^{2,3}, I.Yaminsky^{2,3}

Приближение точности позиционирования к нанометровым величинам обуславливает новый уровень технических требований к оборудованию и обработке элементов привода. Очевидно, что чем точнее механика прецизионной подвижки, тем дороже изготовление ее комплектующих. В определенный момент обычные решения перестают отвечать предъявляемым требованиям в силу роста стоимости и сложности обеспечения необходимой точности изготовления. В настоящей статье рассматривается альтернатива стандартным механическим подвижным элементам и ее применимость в различных отраслях машиностроения и приборостроения.

Approximation of positioning accuracy to nanometer values causes a new level of technical requirements for equipment and processing of drive elements. It is obvious that with increasing accuracy of the mechanics of precision movement, the cost of manufacturing of components increases. At a certain point, conventional solutions do not meet the requirements due to the growing cost and complexity of ensuring the necessary manufacturing accuracy. In this paper we consider an alternative to standard mechanical moving elements and its applicability in various branches of machine building and instrument making.

Бесконтактная магнитная пара винт-гайка является ключевым элементом сверхточного линейного силового привода, перспективного для использования в обрабатывающих центрах, системах позиционирования, точной механике. В данном приводе удается продуктивно сочетать реальный нанометровый уровень точности с неограниченно большими ходами и исключительно высокими силовыми характеристиками – жесткостью, развиваемым усилием [1].

Бесконтактная магнитная пара винт-гайка привлекала внимание инженеров уже полвека назад, но реальные силовые характеристики создававшихся передач были в сотни раз ниже уровня, который бы мог представлять практический интерес [2, 3].

УСТРОЙСТВО МАГНИТНОЙ ВИНТОВОЙ ПАРЫ И ОСОБЕННОСТИ ЕЕ РАБОТЫ

Принцип действия любой магнитной передачи в концептуальном отношении исключительно прост. Его поясняет рис.1, на котором изображены две пары прямоугольных разноименных полюсов

магнитов 1, 2, размещенные с зазором 3 и смещением в латеральном направлении 4. На полюса действует сила, латеральная составляющая которой (на рисунке слева направо) старается выставить полюса друг против друга (для целей привода она полезна), и сила притяжения, которая стремится притянуть полюса друг к другу (вредна из-за угрозы потери бесконтактности). В нашем случае полюса являются гребнями резьбы соответственно винта 5 и гайки 6. Латеральная сила движет гайку при вращении винта, а нормальная стремится "прилепить" гайку к винту. Для того чтобы избежать в паре механического контакта, канавки резьбы винта 7 и гайки 8 заполняют немагнитным компаундом, а в образовавшийся зазор 3 подается с дросселированием сжатый газ, на пленке которого винт "всплывает", чем полностью устраняется контакт и трение в магнитной паре.

Несмотря на простоту принципа действия магнитной пары, ее воплощение в реальную жизнеспособную конструкцию с конкурентными характеристиками оказалось далеко не простым делом. Все работы по магнитным винтовым парам

¹ ООО "Лаборатории Амфора" / Amphora Laboratories.

² МГУ имени М.В.Ломоносова / Lomonosov Moscow State University.

³ Центр перспективных технологий / Advanced Technologies Center.

(вполне качественные с академической точки зрения) по существу заключались в детальном исследовании абсолютно бесперспективных конструкций, скорее как некоего физического объекта (чтобы не сказать, курьеза), со значениями актуальных для целей привода показателей в десятки-сотни раз меньше достижимых в рамках адекватной конструкции [4, 5].

Некоторым исключением является цикл работ по исследованию силовых и вибрационных характеристик, выполненный в США нашим бывшим соотечественником на экземпляре вывезенной из России рудиментарной, но основанной на правильных принципах магнитной передачи и аэростатического привода с ее использованием [6-8].

Адекватные конструкции, пригодные для использования в сверхточных станках, появились лишь после того как нами была поставлена, решена и доведена до уровня системы инженерных требований и рекомендаций по проектированию целая цепочка сложных, далеких от очевидности задач математической физики, аэродинамики и материаловедения [1].

Наличие надежного теоретического фундамента позволило поставить и решить задачу о достижении физически предельных характеристик (в первую

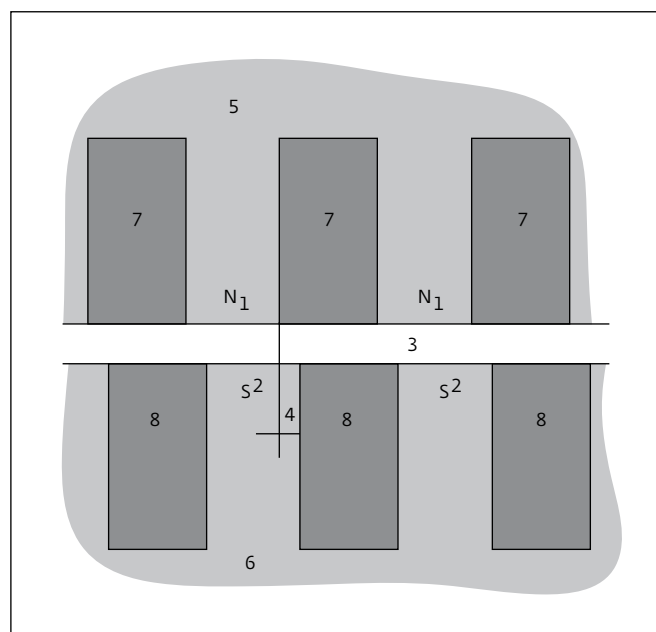


Рис.1. Система полюсов магнитной пары: 1 и 2 – разноименные полюса магнита; 3 – зазор; 4 – смещение в латеральном направлении; 5 – винт; 6 – гайка; 7 – канавка резьбы винта; 8 – канавка резьбы гайки

Fig.1. System of poles of magnetic lead: 1 and 2 – unlike poles of magnet; 3 – clearance; 4 – displacement in lateral direction; 5 – screw; 6 – nut; 7 – screw thread groove; 8 – nut thread groove

The non-contact magnetic screw-nut pair is a key element of the high-precision linear actuator, promising for use in machining centers, positioning systems, precision mechanics. In this driving gear, it is possible to productively combine a real nanometer level of accuracy with unlimitedly large strokes and exceptionally high power characteristics – stiffness, developed force [1].

The non-contact magnetic screw-nut pair attracted the attention of engineers half a century ago, but the real power characteristics of the created transmissions were hundreds of times lower than the level that could be of practical interest [2, 3].

MAGNETIC LEAD SCREW AND FEATURES OF ITS WORK

The principle of operation of any magnetic transmission conceptually is extremely simple. It is

explained in Fig.1, which depicts two pairs of rectangular opposite polarity magnets (1, 2), placed with a gap (3) and displacement in the lateral direction (4). The poles are acted on by a force whose lateral component (in the figure from left to right) tries to set the poles against each other (for the purpose of the drive it is useful), and the force of attraction that tends to pull the poles towards each other (is harmful because of the threat of loss of contactlessness). In our case, the poles are the crests of threads of the screw (5) and the nut (6), respectively. The lateral force moves the nut while the screw rotates, and the normal force tends to "stick" the nut to the screw. In order to avoid mechanical contact in the pair, the thread grooves of screw (7) and nut (8) are filled with a non-magnetic compound, and compressed gas is

throttled into the formed gap (3), on the film of which the screw "floats up", which completely eliminates contact and friction in the magnetic magnetic lead screw.

Despite the simplicity of the principle of the magnetic lead screw's action, its implementation in a real design with competitive characteristics turned out to be far from simple. All work on magnetic lead screws (quite qualitative from the academic point of view) essentially consisted in a detailed study of absolutely unpromising designs, rather as a kind of physical object (not to say, curiosity), in which the values of key characteristics are tens and hundreds of times less than achievable within the framework of adequate design [4, 5].

Some of the exceptions are a series of studies of force and vibration characteristics performed in



Таблица 1. Сравнение характеристик магнитной пары и прямого привода

Table 1. Comparison of characteristics of magnetic lead screw and direct drive

Устройство Mechanism	Магнитная винтовая пара Magnetic lead screw	Прямой привод Direct drive
Точность Accuracy	Исключительно высокая при всех режимах работы Exceptionally high for all modes of operation	Высокая в статике, ограниченная в динамике High in statics, limited in dynamics
Жесткость Rigidity	Высокая при всех режимах работы High for all modes of operation	Высокая в статике, ограниченная в динамике High in statics, limited in dynamics
Потребляемая электроэнергия Power consumption	Очень малая Very small	Очень большая Very big
Тепловыделение Heat dissipation	Ничтожное, удаленное от зоны формирования координаты Negligible, distant from coordinate formation area	Очень большое, непосредственно в зоне формирования координаты Very large, directly in coordinate formation area
Расход сжатого воздуха Compressed air consumption	Средний Average	Средний Average
Расход охлаждающей воды Cooling water consumption	Не нуждается в охлаждении Does not need cooling	Большой High
Система управления Control system	Простая дешевая (open loop) Simple and cheap (open loop)	Сложная дорогая (closed loop) Complex and expensive (closed loop)
Максимальная скорость Maximum speed	От малой до средней Small to medium	Очень высокая Very high

очередь, силовых, а главной среди них – жесткости) и разработать реалистичные и недорогие конструкции и технологии для их производства. Результатом проведенных работ стал привод с магнитной винтовой парой, обеспечивающий практическую точность в единицы нанометров и обладающий удельной жесткостью, которая для больших (диаметр

винта около 50 мм) приводов сравнима с шариковинтовой парой (ШВП), а при диаметре винта около 10 мм выше на 50% и более.

Кинематическая (без внешней нагрузки) точность привода обеспечивается за счет гигантского усреднения случайных ошибок винта вследствие большой рабочей длины гребня резьбы. Двусторонняя

the US by our ex-compatriot, using a specimen of a rudimentary but based on correct principles magnetic transmission and an aerostatic drive with its use, taken out of Russia [6–8].

Adequate designs suitable for use in high-precision machines appeared only after we had solved and brought to the level of the system of engineering requirements and design recommendations a whole chain of complex and non-obvious problems of mathematical physics, aerodynamics and materials science [1].

The presence of a reliable theoretical foundation allowed to solve

the problem of achieving physically limiting characteristics (first of all, power characteristics, and the main one among them – rigidity) and to develop realistic and inexpensive designs and technologies for their production. The result of the work was a drive with a magnetic lead screw, providing practical accuracy in units of nanometers and having a specific rigidity, which for large drives (with screw diameter of about 50 mm) is comparable to a ball screw, and for drives with a screw diameter of about 10 mm is higher on 50 and more percent.

The kinematic (without external load) accuracy of the drive is

ensured by the giant averaging of random errors of the screw due to the large working length of the thread crest. The two-way repeatability of all created transmissions was always below the level of measurements available in the laboratory (10 nm). The error estimates were always better than 1 nm. The in-step and accumulated errors of transmission inherit only the low-frequency component of the systematic error of the screw-cutting machine, which makes it possible to compensate them in the control system by adjusting the angle of rotation of the screw with the accuracy of the metrological device

повторяемость всех созданных передач всегда была ниже доступного в лаборатории уровня измерений (10 нм). Оценки ошибки всегда находились на уровне лучше 1 нм. Внутришаговая и накопленная ошибки передачи наследуют только низкочастотную составляющую систематической ошибки винторезного станка-изготовителя, что позволяет компенсировать их в системе управления углом поворота винта с точностью используемого для аттестации метрологического устройства. Динамическая (с внешней нагрузкой) точность обеспечивается высокими силовыми параметрами магнитной пары.

Таким образом, привод с разомкнутой цепью (open loop) со сравнительно простым угловым датчиком в состоянии обеспечивать элитарную практическую точность в 1 нм на ходах в сотни миллиметров в условиях жесткого силового режима.

В силу требований физики магнитной цепи конструкция магнитной пары тяготеет к нетипичному для ходовых винтов малому шагу (0,05–0,25 мм для однозаходной резьбы), что очевидным образом ограничивает максимальную линейную скорость.

Ценной особенностью магнитной пары являются исключительно низкие механические потери. Так, например, винтовая передача с шагом резьбы 0,1 мм при диаметре винта 60 мм не самотормозится, и, если ее поставить вертикально, то винт магнитной пары под собственной тяжестью будет вкручиваться в гайку.

Физические соображения жестко диктуют также некоторые габаритные особенности пары, например длина магнитной системы гайки не может превышать половины диаметра винта. Известен

случай, когда инженеры-станкостроители, желая за счет увеличения длины гайки вдвое повысить силу передачи, самовольно внесли изменения в геометрию конструкции и... сила закономерно уменьшилась в несколько раз.

Оптимальная магнитная пара, чтобы успешно конкурировать по силе с ШВП, должна состоять из 4–6 типовых идентичных аэромагнитных модулей.

СРАВНЕНИЕ АЛЬТЕРНАТИВ

Конкурентами магнитной винтовой пары являются системы прямого привода с линейным электродвигателем и приводы с гидростатической винтовой передачей. В этом ряду привод с магнитной парой занимает особое место, сочетая основные достоинства конкурентов, и избегая их характерных проблем.

Прямой привод весьма популярен, его производят многие фирмы, и некоторыми специалистами он считается чем-то вроде "абсолютного оружия" в сфере линейного привода с субмикронной точностью. Приводы с гидростатической винтовой передачей – несколько более редкая технология, но их производят и успешно продают немецкие фирмы Hyprostatic [9] и Zollern [10], специализирующиеся на гидростатических станочных узлах. Концептуально магнитная пара ближе к гидростатической винтовой передаче: в обоих случаях используется непрямой (open loop) привод с исключительно точным силовым механизмом преобразования движения и контролем только угловой координаты винта.

used for attestation. Dynamic (with external load) accuracy is provided by high force parameters of the magnetic lead screw.

Thus, an open-loop drive with a relatively simple angle sensor is able to provide practical accuracy of 1 nm with a path length of hundreds of millimeters in the conditions of a hard force mode.

Due to the requirements of the physics of the magnetic circuit, the design of the magnetic lead screw tends to a small step (0.05–0.25 mm for a single thread) that is not typical for lead screws, which obviously limits the maximum linear velocity.

A valuable feature of the magnetic lead screw are extremely low mechanical losses. For example, a screw gear with a thread pitch of 0.1 mm with a screw diameter of 60 mm does not self-brake, and if it is installed vertically, the screw of the magnetic pair under its own weight will be screwed into the nut.

Physical considerations rigidly dictate also some overall characteristics of the pair, for example the length of the magnetic system of the nut can not exceed half the diameter of the screw. There is a well-known case when machine-tool engineers, wishing

to double the force of transmission by increasing the length of the nut, arbitrarily made changes in the geometry of the design and... the force naturally decreased several times.

The optimum magnetic lead screw to successfully compete in the force parameters with the ball screw must consist of 4–6 typical identical aeromagnetic modules.

COMPARISON OF ALTERNATIVES

Competitors of the magnetic lead screw are direct drive systems with a linear motor and drives with hydrostatic lead screw. Among them, the drive with a magnetic



Таблица 2. Сравнение характеристик магнитной пары и гидростатической винтовой передачи

Table 2. Comparison of characteristics of magnetic lead screw and hydrostatic lead screw

Устройство Mechanism	Магнитная винтовая пара Magnetic lead screw	Гидростатическая винтовая передача Hydrostatic lead screw
Точность Accuracy	Исключительно высокая при любых длинах винта Exceptionally high for all screw lengths	Высокая с коротким винтом, умеренная с длинным винтом High for short screw, moderate for long screw
Жесткость Rigidity	Высокая при любой длине винта High for any screw length	Очень высокая с коротким винтом, умеренная с длинным винтом Very high for short screw, moderate for long screw
Потребляемая электроэнергия Power consumption	Очень малая Very small	Средняя Average
Тепловыделение Heat dissipation	Ничтожное, удаленное от зоны формирования координаты Negligible, distant from coordinate formation area	Среднее в зоне формирования координаты Average in coordinate formation area
Давление сжатой текучей среды, атм. Pressure of compressed fluid, atm.	5–8 (воздух) 5–8 (air)	До 100 (масло) Up to 100 (oil)
Расход сжатой текучей среды Compressed fluid consumption	Средний Average	Большой High
Максимальная скорость Maximum speed	От малой до средней Small to medium	От средней до большой Medium to large
Система управления Control system	Простая дешевая (open loop) Simple and cheap (open loop)	Простая дешевая (open loop) Simple and cheap (open loop)

В табл.1 и 2 приведено попарное сравнение характеристик трех обсуждаемых приводов с минимальными комментариями.

Табл.1 демонстрирует решительное превосходство магнитной пары над прямым приводом по всем

показателям за исключением, может быть, максимальной скорости. Действительно, при однозаходной резьбе с малым шагом, скорость больших станочных приводов с магнитной парой ограничена величиной около 300 мм/мин, а скорость малых

lead screw occupies a special place, combining the main advantages of competitors, and avoiding their characteristic problems.

Direct drive is very popular, it is produced by many companies, and by some experts it is considered something like an "absolute weapon" in the sphere of linear drive with submicron accuracy. Drive with hydrostatic transmission is a somewhat rarer technology, but it is produced by such German companies as Hyprostatic [9] and Zollern [10], specializing in hydrostatic machine components. Conceptually, the magnetic lead screw is closer to the hydrostatic

lead screw: in both cases an open loop drive is used with an exceptionally accurate motion transformation mechanism and monitoring of only the angular coordinate of the screw.

Tables 1 and 2 show a pairwise comparison of the characteristics of the three discussed drives with minimal comments.

Table 1 demonstrates the decisive superiority of the magnetic lead screw over the direct drive in all respects, with the exception, perhaps, of maximum speed. Indeed, for a single-thread with a small pitch, the speed of large machine drives with a magnetic lead screw

is limited to about 300 mm/min, and the speed of small drives is 500 mm/min. But this limitation, firstly, is easily managed by using a multiple thread, and secondly for equipment with practical accuracy of a few tens of nanometers, the time savings on free operation is usually not relevant. But the ability to use the motion transformation mechanism with a huge multiplicity can be very productive.

Table 2 reveals two points that require closer comparison. The maximum speed for hydrostatic transmission is significantly lower than for a linear motor, but, nevertheless, it is noticeably higher



приборных приводов – величиной 500 мм/мин. Но это ограничение, во-первых, легко обходится за счет использования многозаходной резьбы, а во-вторых, для оборудования с практической точностью в единицы-десятки нанометров экономия времени на свободных ходах оказывается, как правило, неактуальной. А вот возможность использовать механизм преобразования движения с огромной кратностью может быть весьма продуктивной.

Табл.2 позволяет выявить два пункта, которые требуют более внимательного сравнения. Максимальная скорость у гидростатической передачи существенно ниже, чем у линейного двигателя, но, тем не менее, заметно выше, чем у магнитной пары. Обсуждение этого обстоятельства повторяет аргументацию комментария к табл.1.

Вопрос о соотношении жесткостей требует более детального разбора. Жесткость собственно гидростатической пары винт-гайка в 3-4 раза превосходит жесткость оптимально сконструированной магнитной пары. Однако на практике она явно избыточна. В полной системе привода все остальные силовые элементы (подшипники и, в особенности, винт) имеют существенно меньшую жесткость, а, как известно, результирующая жесткость упругой системы определяется слабым элементом. Таков винт в гидростатической передаче, у которого за счет глубоко врезанных канавок резьбы сильно ослаблена осевая жесткость, и в еще большей степени – жесткость "на скрутку". При больших оборотах винта вязкое трение создает вращающий момент, который сильно скручивает ослабленный

винт, что приводит к возникновению дополнительной и весьма существенной ошибки. Винт у магнитной пары цельный и жесткий, и это практически уравнивает ее динамическую точность в сравнении с гидростатической передачей во всех реалистических ситуациях. При этом, магнитная пара свободна от проблем с высоким давлением и перегревом масла.

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА МАГНИТНОЙ ПАРЫ. ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Мы указывали выше на субъективные проблемы, которые до поры до времени препятствовали успешному использованию приводов с магнитной парой в промышленности. Однако в их развитии большую роль играли и объективные трудности. Необходимо было создать технологии работы с редкоземельными магнитами, магнитомягкими сплавами, немагнитными сталями, пористыми материалами. Значительные трудности у машиностроителей вызвала необходимость нарезания мелкой (шаг 0,1 мм) резьбы непривычных профилей в капризных магнитных сплавах. Решение этих проблем стало возможным благодаря усилиям небольшого числа людей. Существенную роль сыграло и то, что называется индивидуальным личным мастерством, часто упоминаемое в негативном аспекте, но без которого немислимы первые шаги многих больших дел.

К настоящему времени мы располагаем работающими образцами одномодульных магнитных

than for a magnetic lead screw. The discussion of this circumstance repeats the arguments of the commentary to Table 1.

The question of the ratio of the rigidities requires more detailed analysis. The rigidity of the hydrostatic lead screw itself is 3-4 times higher than that of the optimally designed magnetic lead screw. However, in practice it is clearly redundant. In the complete drive system, all other power elements (bearings and, in particular, the screw) have significantly less stiffness, and, as is known, the resultant rigidity of the elastic system is determined by the weakest element.

It is the screw in the hydrostatic transmission, which, due to the deeply incised grooves of the thread, greatly reduces the axial rigidity, and even more, the twist rigidity. At high screw speeds, viscous friction creates a torque that strongly attenuates the weakened screw, which leads to an additional and very significant error. The screw of the magnetic lead screw is solid and rigid, and this practically equates its dynamic accuracy in comparison with hydrostatic lead screw in all realistic situations. At the same time, the magnetic lead screw is free of problems with high pressure and overheating of the oil.

SPECIFIC TECHNOLOGICAL PROBLEMS IN PRODUCTION OF MAGNETIC LEAD SCREW. HISTORY AND CURRENT STATUS

We have pointed out above the subjective problems that, for the time being, prevented the successful use of magnetic lead screw in the industry. However, objective difficulties also played a big role in their development. It was necessary to create technologies for working with rare-earth magnets, magnetically soft alloys, non-magnetic steels, porous materials. A significant difficulty for machine builders was the cutting of a shallow (0.1 mm pitch) thread of unusual



Рис.2. Магнитные винтовые пары диаметром 20, 25 мм и технологический образец винта 50 мм

Fig.2. Magnetic lead screws with 20 mm and 25 mm diameters and sample of 50 mm screw

винтовых пар. На рис.2 представлены пары диаметров 20 и 25 мм в сборе и технологический образец длинного ходового винта с диаметром 50 мм. Нами изготовлен и отправлен зарубежному заказчику привод для записи матриц CD, который работает уже около 15 лет.

На рис.3 приведен демонстрационный макет привода с винтом диаметром 20 мм и дискретом 1 нм. Мы располагаем оптимальными конструкциями и воспроизводимыми промышленными технологиями изготовления одномодульных магнитных винтовых пар в широком диапазоне размеров

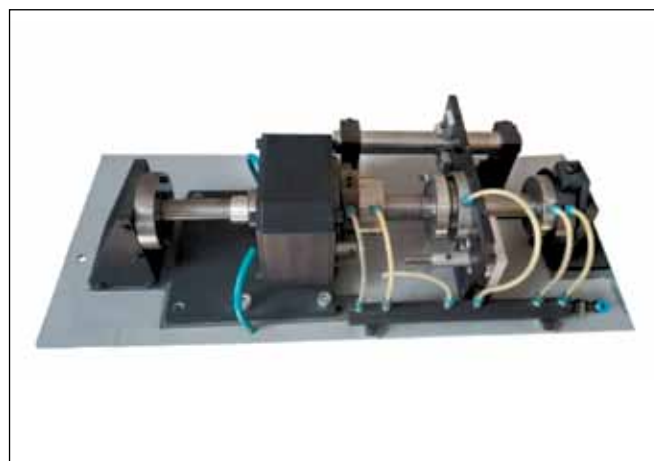


Рис.3. Макет комплектного привода с винтом диаметром 20 мм и дискретом 1 нм

Fig.3. Model of complete drive with 20 mm screw and 1 nm resolution

и характеристик (с диаметром винта от 10 до 60 мм). Разработаны магнитные пары с оптимальным числом модулей (4-6) с обновленной конструкцией магнитной цепи и технологией намагничивания. Именно такое решение должно задать промышленный стандарт серийных магнитных винтовых пар.

В технической политике применения магнитных передач просматриваются две ветви – промышленная и приборная. Промышленная ветвь делает особую ставку на высокие силовые параметры приводов (жесткость 1000–1500 Н/мкм) и большие хода (500 мм и более). В металлообработке эта технология вместе

profiles in capricious magnetic alloys. The solution of these problems became possible thanks to the efforts of a small number of people. An important role was played by what is called individual personal mastery, often mentioned in a negative aspect, but without which the first steps of many great things are inconceivable.

By now we have working samples of single-module magnetic lead screw. Fig.2 shows pairs of diameters of 20 mm and 25 mm in assembly and a technological sample of a long lead screw with a diameter of 50 mm. We have manufactured and supplied to a foreign customer

a drive for recording CD matrices, which has been operating for about 15 years.

Fig.3 shows a demonstration model of the drive with a screw with a diameter of 20 mm and a resolution of 1 nm. We have optimal designs and reproducible industrial technologies for manufacturing single-module magnetic lead screws in a wide range of sizes and characteristics (with a screw diameter from 10 to 60 mm). Magnetic lead screws with an optimal number of modules (4-6) with an updated design of the magnetic circuit and magnetization technology have been developed. Such a solution should set the

industrial standard for serial magnetic lead screws.

In the technical policy of the application of magnetic transmissions, two branches are seen: industrial and instrumental. The industrial branch places special emphasis on the high force parameters of the drives (stiffness: 1000–1500 N/μm) and large strokes (500 mm and more). In metalworking, this technology, together with advanced metal processing (for example, hard turning), will provide a revolutionary transformation of the production processes of precision engineering products. The highest level of accuracy will allow

с передовыми технологиями металлообработки (например, твердым точением) обеспечит революционное преобразование процессов производства точных изделий машиностроительного ряда. Высочайший уровень точности позволит получать детали высших качеств, соответствующих доводочной шлифовке и доводке свободным абразивом, на токарных и вихрефрезероувальных станках за один постанов черновых заготовок.

В приборной ветви будут доминировать требования практической точности, которая в рамках данного подхода может быть доведена до 0,1 нм при ходе около 25 мм. Для этого круга задач конкуренцию могут составлять шаговые пьезодвигатели, у которых ход имеет тот же порядок, и разрешение также на уровне долей нанометра. Преимущества приводов с магнитной парой заключаются в схеме с разомкнутой цепью, которая не требует внешней реперной "линейки", а также в полном отсутствии вибрации. Для решения производственных задач при создании магнитных винтовых пар этого класса необходимо дополнительно применить новейшие технологии формирования заданного рельефа с помощью микромашиинга фемтосекундным лазером.

При анализе характеристик субпрецизионной механики возникает вопрос: каким образом и где возможно применение данных изделий? В области машиностроения это могут быть комплексы по металлообработке, использующиеся в аэрокосмической, электронной и оптико-механических областях (производство компонент систем

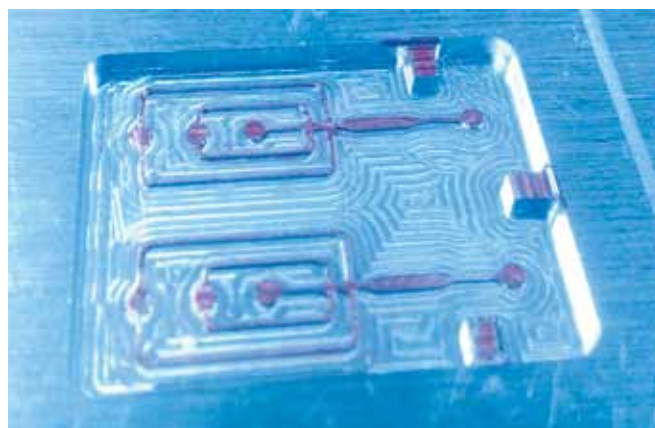


Рис.4. Матрица для микрофлюидных чипов, сделанная по заказу ООО "Микрофлюидные технологии"

Fig.4. Matrix for microfluidic chips made for Microfluid Technologies Ltd.

позиционирования, зеркал, прецизионных муфт и т.д.). Огромным плюсом, как сказано выше, является одноэтапность производства сложных поверхностей с высокими качествами точности обработки.

Компания "Центр перспективных технологий" уже на протяжении нескольких лет ведет успешное внедрение и производство металлообрабатывающих малогабаритных фрезерных центров, предназначенных для обучения и производства [11]. Широкий спектр задач, поставленных перед станками с ЧПУ ATCNano, успешно выполняются благодаря точности (около 0,002 мм по всем осям), жесткости (консольная

obtaining details of higher qualities, corresponding to polishing and free abrasive finishing, on turning and vortex milling machines for one mounting of rough blanks.

In the instrument branch, the requirements of practical accuracy will dominate, which, within the framework of this approach, can be brought to 0.1 nm with a stroke of about 25 mm. In this range of tasks, piezo stepper motors can be competitors, in which the stroke is of the same order, and the resolution is also at the nanometer level. Advantages of magnetic lead screws are the use of an open-circuit that does not require an

external reference "ruler", as well as the complete absence of vibration. To solve production problems when creating magnetic lead screws of this class, it is necessary to additionally apply the latest technologies of the femtosecond laser micromachining.

When analyzing the characteristics of sub-precision mechanics, the question arises: how and where the application of these products is possible? In the field of mechanical engineering, this can be metalworking complexes used in aerospace, electronic and optical-mechanical fields (the production of components of positioning

systems, mirrors, precision couplings, etc.). A huge plus, as mentioned above, is the one-stage production of complex surfaces with high machining accuracy.

For several years, the Advanced Technologies Center has been successfully implementing and manufacturing small-sized machining centers for training and production [11]. A wide range of tasks of ATCNano CNC machines are successfully carried out due to the accuracy (about 0.002 mm in all axes), rigidity (cantilevered design) and high productivity (feeding using ball screws and linear guides, 1800 mm/min). Fig.4 shows the

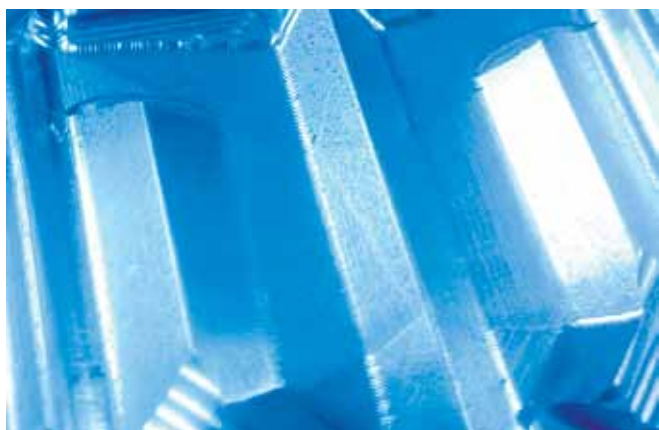


Рис.5. Рельефная поверхность, полученная фрезеровкой сферической фрезой с шагом 0,05 мм

Fig.5. Relief surface obtained by milling with spherical cutter with 0.05 mm pitch

конструкция станка) и высокой производительности (подача за счет ШВП и линейных направляющих – 1800 мм/мин). На рис.4 представлена матрица, используемая для производства микрофлюидных чипов методом мягкой литографии. Габариты матрицы – 32×24 мм, размер дорожек – 0,2×0,2 мм.

С помощью современного программного обеспечения также достигается значительная точность при аппроксимации сложных поверхностей одним инструментом. На рис.5 представлен фрезерованный рельеф, полученный при аппроксимации сферической фрезой D4, R2 с шагом 0,05 мм (материал – Д16Т).

matrix used to produce microfluidic chips by the method of soft lithography. The dimensions of the matrix are 32×24 mm, the size of the tracks is 0.2×0.2 mm.

With the help of modern software, significant accuracy is also achieved when approximating complex surfaces by a single tool. Fig.5 shows the milled relief obtained by approximating using the spherical cutter D4, R2 with a pitch of 0.05 mm (material: Д16Т).

The development of the ATCNano CNC milling center project (Fig.6), designed using modern mechanical, electronic and electromechanical components, does not stand still.

Mastering in production and replacement of standard mechanical components such as ball screw and lead screw with nut, by precision magnetic lead screws, opens new possibilities and expands the field of application of equipment. Taking into account the development and implementation of new frictionless components, the approach to nanometer accuracy of processing already seems not a fantasy, but a reality.

In addition to material processing complexes, the company is engaged in the development and testing of automated precision movements for laboratory equipment and microscopy [12, 13]. At compact dimensions

(200×200 mm), the installation of tracking sensors and micro ball screws allowed, in conjunction with the advanced electronic (controller, driver) and electromechanical (servo motors) parts, to obtain fully automated imaging with accuracy unattainable for conventional manual movements and stages. Further complete replacement of the movable mechanics by a non-contact magnetic mechanism will allow us to approach the accuracy of displacements, which is comparable to piezoceramic motors and tubes but appreciably benefits in ease of adjustment and speed of movement. ■



Рис.6. Фрезерный центр ATCNano с блоком управления и защитным корпусом

Fig.6. ATCNano milling center with control unit and protective housing



Рис.7. Станок ATCNano с демонтированной гофрозащитой. ШВП и линейные направляющие класса точности C7 в совокупности с бесконтактными датчиками обеспечивают прецизионную точность в обработке даже закаленных сплавов алюминия

Fig.7. ATCNano machine with dismantled corrugated protection. C7-class ball screws and linear guides in combination with non-contact sensors provide precision in processing of even hardened aluminum alloys

Развитие проекта фрезерного центра с ЧПУ ATCNano (рис.6), спроектированного с применением современных механических, электронных и электромеханических компонент, не стоит на месте. Освоение в производстве и замена стандартных механических комплектующих, таких как ШВП, ходовой винт с гайкой, на прецизионные магнитные винтовые пары, открывает новые возможности и расширяет области применения оборудования. С учетом разработки и внедрения новых бесфрикционных компонент, приближение к нанометровой точности обработки уже кажется не фантастикой, а закономерной реальностью.

Помимо материалобрабатывающих комплексов, компания занимается разработкой и испытаниями автоматизированных прецизионных подвижек для лабораторного оборудования и микроскопии [12, 13]. При компактных габаритах (200×200 мм) установка датчиков слежения и микро-ШВП позволила, в совокупности с передовой электронной (контроллер, драйвер), электромеханической (серводвигатели) частями получать полностью автоматизированную

съемку изображений с точностью, недостижимой обычными ручными подвижками и столиками. Дальнейшая полная замена подвижной механики на бесконтактно-магнитную позволит приблизиться к точности перемещений, сравнимой с пьезокерамическими двигателями и трубками, но заметно выигрывающей в простоте настройки и скоростях перемещений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Индукаев К.В. Бесконтактные сверхточные мехатронные узлы и их компоненты разработки Российской компании "Лаборатории Амфора" // Приводная техника. 2008. № 2 (72). С. 38-47.
2. Литвиненко Д.В. Магнитная винтовая передача // В сб. Методы повышения точности и производительности металлорежущих станков. ЭНИМС. – Машиностроение, 1967.
3. Литвиненко Д.В. Гидростатическая винтовая передача // В сб. Методы повышения точности и производительности металлорежущих станков. ЭНИМС. – Машиностроение, 1967.
4. Shinshi T., Hashimoto Ju., Chen B.-Ch., Sato K., Shimokohbe A. A New Magnetic Lead Screw and Its Basic Characteristics, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C. Vol. 64 (1998) No. 618. P. 690-697.
5. Chang T.N., Wong T., Bhaskar D., Ji Zh., Shimanovich M., Caudill R. Control of ultrahigh-precision magnetic leadscrew using recurrent neural networks. Proc. SPIE 3518, Sensors and Controls for Intelligent Machining. Agile Manufacturing and Mechatronics. 1998/12/17. DOI: 10.1117/12.332796.
6. <http://dx.doi.org/10.1117/12.332796>.
7. <http://ieeexplore.ieee.org/document/908390>.
8. USA Patent № 5.990.587.
9. <http://www.hyprostatik.de/startseite>.
10. <http://docplayer.net/31645531-Drive-technology-hydrostatic-bearing-systems.html>.
11. Ахметова А., Белов Ю., Яминский И. Трехкоординатный фрезерно-гравировальный центр с ЧПУ ATCNano // НАНОИНДУСТРИЯ. 2017. №5(76). С. 62-64.
12. Ахметова А., Белов Ю., Мешков Г., Яминский И. Системы 3D-позиционирования в точной обработке материалов // НАНОИНДУСТРИЯ. 2017. №1(71). С. 102-104.
13. Ахметова А., Белов Ю., Яминский И. Модульный многоосевой обрабатывающий центр для nanoиндустрии // НАНОИНДУСТРИЯ. 2016. №6(68). С. 82-84.