

УДК 621.833; 669.056.9 : 629.118.6

А.С. КАЛИНИЧЕНКО, д-р техн. наук
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Е.И. МАРДОСЕВИЧ, канд. техн. наук; А.А. ГЛАЗУНОВА
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПАР ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены вопросы разработки и создания композиционных материалов для пар трения скольжения мехатронных систем прецизионного оборудования точного электронного машиностроения.

Ключевые слова: композиционный материал, пара трения, трение скольжения, мехатронная система, прецизионный электрошпиндель

Введение. В машиностроении в подвижных соединениях используются различные типы подшипниковых узлов, к наиболее простым и экономически целесообразным из которых можно отнести подшипники качения и скольжения. При этом, несмотря на более высокий комплекс служебных свойств по КПД и ресурсу у пар трения качения, в отдельных узлах достаточно широко используются пары трения скольжения (подшипники скольжения, направляющие, втулки). Это позволяет повысить жесткость узлов, уменьшить их габаритные размеры, улучшить теплоотвод и обеспечить снижение шума и вибраций. Однако при этом, в ряде случаев, при использовании пар трения скольжения возникают более высокие, по сравнению с подшипниками качения, потери на трение, а значит и больший уровень тепловыделения. Повышается вероятность возникновения ситуаций, при которых возникает заедание трущихся поверхностей. Еще более остро эти проблемы стоят при применении подшипников скольжения в прецизионном оборудовании, которое, как правило, функционирует при стабилизированных по температуре и влажности внешних условиях. В частности, это важно для электрошпинделей, используемых для лезвийной обработки деталей. В них существует два основных, не связанных между собой, внутренних источника выделения тепла, которые образуются как результат функционирования электродвигателя и трения в подшипниках скольжения. Для комплексного решения этой проблемы применительно к высокоскоростным прецизионным электрошпинделям горизонтального, а в отдельных случаях и вертикального исполнения, используются аэроэстатические опоры.

Создание прецизионных электрошпинделей горизонтального типа на аэроэстатических опорах является технически непростой задачей и существенно усложняется тем, что в вертикальных прецизионных электрошпинделях по мере возрастания их мощности увеличивается тепловыделение в электродвигателе. Учитывая необходимость поддержания минимальных зазоров в этих опорах, задача отвода тепла от электродвигателя существенно усложняется. Вместе с тем при лезвийной скоростной обработке проблемы, связанные с тепловыми процессами, в ряде случаев могут быть успешно решены путем использования технических решений на основе комплексного применения композиционных антифрикционных покрытий в подшипниках сколь-

жения [1–3] и изготовления основных компонентов электрошпинделя из материалов с повышенной теплопроводностью.

Целью проведения НИР является разработка методических подходов к созданию и рациональному конструированию пар трения скольжения на основе применения покрытий из композиционных антифрикционных материалов, используемых в вертикальных прецизионных программно-управляемых электрошпинделях для скоростной лезвийной обработки поверхностей из медных сплавов.

Методический подход. В качестве объекта исследований принят прецизионный шпиндель для планаризации лезвийной обработкой плоских поверхностей пластин с поверхностным слоем из медных сплавов. Одним из основных компонентов этих шпинделей, во многом определяющим его служебные свойства, являются подшипниковые узлы, рациональное конструктивное исполнение которых в рассматриваемом случае должно быть ориентировано на обработку деталей с точностью размеров до 0,01 мкм и шероховатостью обработанной поверхности не более 20 нм.

На рисунке 1 приведена схема выбора подшипникового узла для прецизионного шпинделя [1].

В качестве базовых вариантов примем схемы обработки и конструктивного исполнения шпинделя, показанные на рисунке 2.

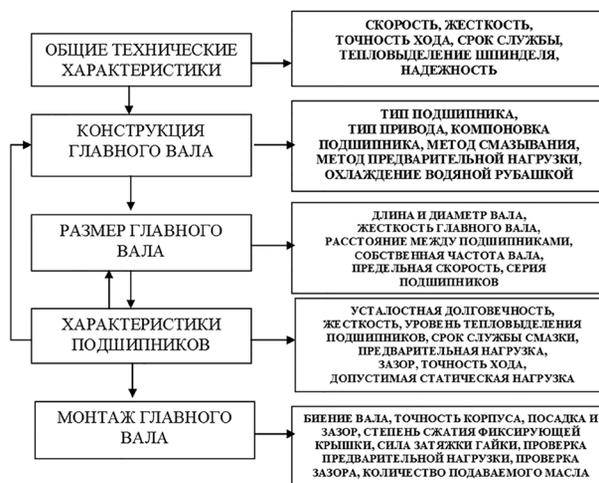


Рисунок 1 — Схема выбора подшипникового узла [1]

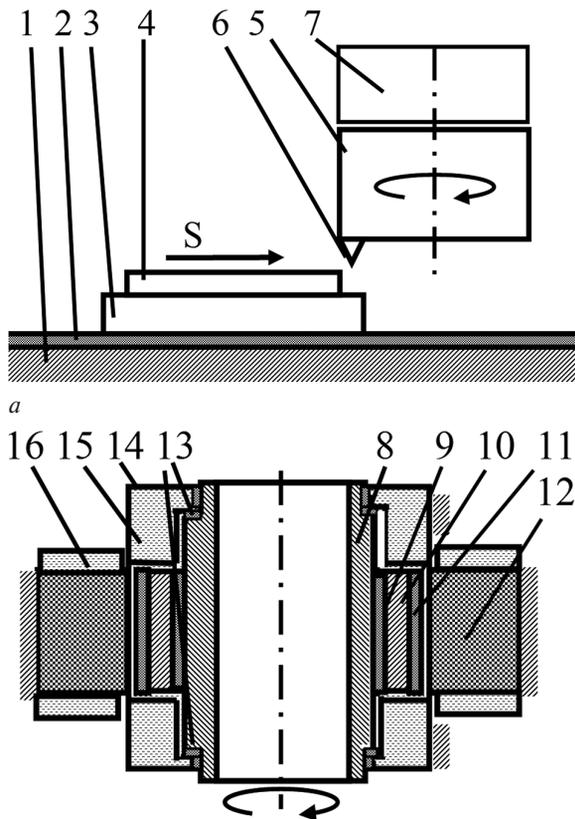


Рисунок 2 — Условные схемы планаризации пластины (а) и используемого для этого электрошпинделя (б): 1 — основание; 2 — опора с антифрикционным покрытием; 3 — подвижный стол; 4 — обрабатываемая пластина; 5 — шпиндель; 6 — алмазный резец, установленный на валу шпинделя; 7 — консоль для крепления шпинделя; 8 — вал шпинделя; 9 — теплоизолирующий (керамический) кольцевой элемент; 10 — стальная втулка; 11 — постоянные магниты ротора бесколлекторного асинхронного программно-управляемого электродвигателя, установленные на стальной втулке 10; 12 — магнитоэлектрические модули статора электродвигателя; 13 — антифрикционные наноструктурированные композиционные покрытия на опорных поверхностях подшипника скольжения вала шпинделя; 14 — принудительно охлаждаемый сборный корпус шпинделя; 15, 16 — рабочая жидкость системы охлаждения соответственно подшипников скольжения и магнитоэлектрических модулей

Рассмотрим более подробно показанную на рисунке 1 схему с позиций скоростных и тепловых факторов.

Скорость вращения шпинделя. При планаризации пластин путем снятия припуска с нанесенного на их поверхности медного сплава скоростным резанием алмазным инструментом наиболее целесообразно (с позиций качества обработки) использование скоростей обработки более 700 м/мин. Учитывая современные достаточно высокие требования к разноразмерности обработанных пластин, которая не должна превышать ± 1 мкм, и шероховатости обработанной поверхности (не более 20 нм), необходимо обеспечение высокой жесткости шпинделя при обработке. Для этого, в свою очередь, целесообразно применение при высоких скоростях вращения шпинделя аэростатических опор, либо, при относительно малых скоростях его вращения, опор скольжения. Выполнение опор скольжения целесообразно с максимальным возможным диаметром и возможностью размещения на этом диаметре режущего алмазного инструмента.

При планаризации пластин 200×200 мм резанием вращающимся алмазным инструментом с продольной подачей стола, как это показано на рисунке 2 а, диаметр подшипниковых опор и диаметр, на котором размещен обрабатываемый инструмент, могут быть приняты ориентировочно равными $\varnothing 210$ мм. Таким образом, для реализации приведенных выше линейных скоростей резания достаточна частота вращения шпинделя 1050–1200 об/мин, которой соответствует скорость скольжения в парах трения скольжения $\sim 11,5$ –13,0 м/с. Это вполне приемлемо для современных подшипников скольжения с композиционными покрытиями на основе, например, бронзографитовых, в т. ч. наноструктурированных, составов.

Тепловыделение в парах трения скольжения электрошпинделя. Тепловыделение в парах трения скольжения с композиционными покрытиями на основе бронзографита в основном определяется коэффициентом трения, нагруженностью и скоростью скольжения. В ряде случаев подшипник скольжения может использоваться без принудительной смазки вследствие его пористости и наличия масла в порах материала. Однако и при этом коэффициент трения при ограниченной смазке имеет величину 0,04–0,06, со смазкой — 0,004–0,006, а скорость скольжения и давление могут достигать 20 м/с и 6–8 МПа соответственно [2–15].

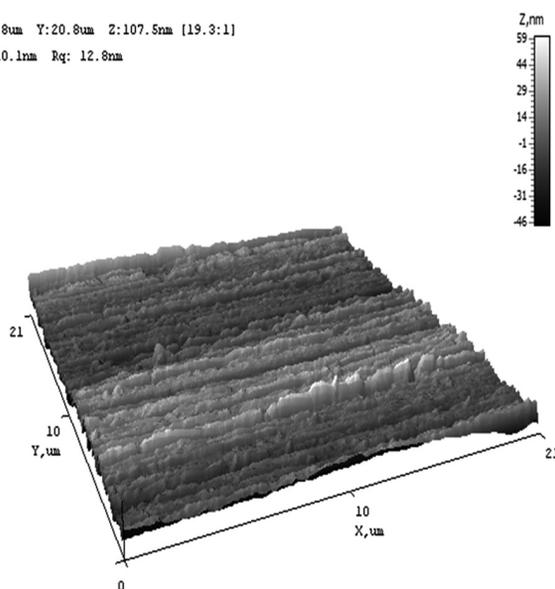
Учитывая незначительные усилия при алмазной обработке и возможность минимизации веса вала шпинделя путем использования при его создании алюминиевых сплавов, можно обеспечить минимизированные, в основном для создания предварительного нагружения в осевом направлении, контактные давления в опорных подвижных соединениях. Это позволит снизить тепловыделение в парах трения скольжения до приемлемого уровня. Для снижения отрицательного влияния тепловыделений в двигателе на параметры функционирования электрошпинделя целесообразно использовать теплоизолирующую (например, керамическую) цилиндрическую втулку с переходной посадкой на некруглое отверстие на роторе [16–22], а наиболее нагревающиеся магнитоэлектрические модули двигателя разместить с внешней стороны и обеспечить дифференцированный отвод тепла от этих модулей и опор скольжения (рисунок 2). С целью повышения эффективности использования рассматриваемого технического решения для изготовления полого вала и корпуса электрошпинделя целесообразно использовать алюминиевые сплавы, имеющие не только втрое меньший удельный вес по сравнению со сталью, но и во столько же раз большую теплопроводность. Вместе с тем твердость алюминиевых сплавов относительно невелика, что во многом может оказывать существенное влияние на износостойкость трущихся поверхностей и, как следствие, срок службы электрошпинделя и его надежность из-за повышения вероятности заедания пары трения скольжения. Поэтому к одной из наиболее технически сложных и проблемных задач в приведенном выше техническом решении можно отнести создание антифрикционных покрытий на рабочих поверхностях пар трения скольжения, которые не будут взаимодействовать с ответной парой в широком диапазоне скоростей и давлений.

К одному из перспективных путей решения этой задачи можно отнести реализацию следующей технологической схемы:



а

X: 20.8um Y: 20.8um Z: 107.5nm [19.3:1]
Ra: 10.1nm Rq: 12.8nm



б

Рисунок 3 — Образец с механически обработанной поверхностью МДО-покрытия (а) и топография этой поверхности (б)

- формирование в качестве подложки на рабочих поверхностях пар трения скольжения методом анодно-катодной микродуговой обработки МДО-покрытия толщиной 70–90 мкм, исключаяющей продавливание опорной поверхности и возникновение заедания при попадании абразивных частиц;
- подготовка поверхности МДО-покрытия под последующую обработку;
- поверхностное плакирование МДО-покрытия антифрикционным материалом на основе бронзографита.

В рассматриваемой технологической схеме взаимосвязанные между собой операции подготовки поверхности МДО-покрытия под последующее плакирование и ее плакирование определяют адгезионную прочность сцепления антифрикционного покрытия с МДО-покрытием. При этом целесообразно учитывать следующее:

- даже при механической суперфинишной обработке поверхности МДО-покрытия (рисунок 3 а) топография этой поверхности остается достаточно развитой (рисунок 3 б), а анализ микроструктуры свидетельствует о наличии значительного числа пор и трещин;
- адгезия антифрикционных материалов на основе медных сплавов при их нанесении на поверхность МДО-покрытия механическим способом невелика;
- для обеспечения высоких адгезионных свойств антифрикционного плакирующего слоя на поверхности МДО-покрытия целесообразно использование технологической схемы, включающей:
 - а) механическую обработку поверхностного слоя МДО-покрытия для удаления его наиболее дефектной части;
 - б) формирование на поверхности МДО-покрытия наноразмерного слоя из материала, заполняющего в процессе нанесения впадины, поры и трещины на его поверхности (например, медного слоя, наносимого электронно-лучевой обработкой) и обеспечивающего высокие адгезионные свойства при нанесении на него механическим способом бронзографита;
 - в) формирование на поверхности пары трения скольжения гибким инструментом плакирующего слоя бронзографита толщиной 3–5 мкм с последующей дополнительной обработкой нанесенного слоя пластическим деформированием.

Выводы. В результате анализа источников научно-технической информации и особенностей процесса планаризации пластин поверхностных слоев из медных сплавов предложена схема конструкционного исполнения прецизионного вертикального электрощпинделя с подшипниками скольжения, обеспечивающими его повышенную жесткость при скоростной лезвийной обработке алмазным инструментом. Предложены методические подходы к созданию на рабочих поверхностях пар трения скольжения из алюминиевых сплавов многослойных покрытий из композиционных антифрикционных материалов на основе МДО-покрытия и бронзографита, обеспечивающие требуемый комплекс антифрикционных свойств и высокие адгезионные свойства и надежность.

Список литературы

1. Сигитов, Е.А. Перспективы применения многоступенчатых фрикционных передач для сверхпрецизионной обработки / Е.А. Сигитов, М.В. Виноградов // Вестн. СГТУ. — 2011. — № 2(56). — Вып. 2. — С. 144–150.
2. Бальшин, М.Ю. Порошковая металлургия / М.Ю. Бальшин. — М., 1948.
3. Ракоцкий, В.С. Металлокерамика в машиностроении / В.С. Ракоцкий, В.В. Саклинский. — М., 1956.
4. Технический справочник http://razvitie-pu.ru/?page_id=20814 / ЗАО «ПРОМГЛЕКС-М». — Режим доступа: <http://www.ssr.ru/sale/?&s=7691>.
5. Петров, Н.И. Пути повышения надежности и ресурса подшипников опор роторов современных газотурбинных двигателей и редукторов / Н.И. Петров, Ю.Л. Лаврентьев // Вестн. Самарского гос. аэрокосмического ун-та. — 2015. — Т. 14, № 3, Ч. 1. — С. 228–236.
6. Керамические тела качения перспективных шарикоподшипников: материал, технология изготовления и механическая обработка, расчеты и испытания / Т.Д. Каримбаев [и др.] // Композиты и наноструктуры COMPOSITES and NANOSTRUCTURES. — 2010. — № 2. — С. 12–27.
7. Доценко, В.Н. Вопросы исследования керамических и гибридных подшипников качения и их применение в авиационных двигателях / В.Н. Доценко, С.В. Никитин //

- Авиационно-космическая техника и технология. — 2008. — № 8(55). — С. 138–144.
8. Загашвили, Ю.В. Производство изделий из современных композиционных материалов, модифицированных наноразмерными компонентами / Ю.В. Загашвили, В.И. Кулик, А.С. Орыщенко // Инновации. — 2007. — № 12(110). — С. 94–98.
 9. Барманов, И.С. Исследование осевых динамических характеристик подшипника №126126 с керамическими шариками / И.С. Барманов // Автоматизированное проектирование в машиностроении. — 2014. — № 2. — С. 194–195.
 10. Оптимизация технологии термодиффузионной обработки керамических порошков для плазменного напыления внешних колец подшипников электроустановок / О.Г. Девойно [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. — 2015. — № 1(51). — С. 48–55.
 11. Исаева, Е.А. Создание компенсаторов термических напряжений для перспективного авиационного ГТД методами порошковой металлургии / Е.А. Исаева, С.А. Первоин, Д.А. Исаев // Изв. МГТУ МАМИ. — 2013. — Т. 2, № 2(16). — С. 331–336.
 12. Панов, А.Д. Трибологические особенности конструкционных керамических материалов в подшипниках скольжения [Электронный ресурс] / А.Д. Панов, И.М. Панова // Наукоедение. — 2015. — Т. 7, № 1. — С. 1–9. — Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/78TVN115>.
 13. Сердобинцев, Ю.П. Обзор и анализ применения керамических материалов в различных отраслях промышленности / Ю.П. Сердобинцев, М.Ю. Харьков, Наззал Анан Се // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 1. — Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12085>.
 14. Воловик, А.П. Высокоскоростные подшипники качения генератора для газотурбинных установок / А.П. Воловик, М.Е. Коварский, В.А. Зайцев // Вопросы электромеханики. — 2014. — Т. 139. — С. 1–6.
 15. Втулки, подшипники / Graphite & Carbon. Украинский углеродный портал. — Режим доступа: <http://carbon.com.ua/produkcija/vtulki/>.
 16. Чарнко, Д.В. Профильные соединения валов и втулок в машиностроении / Д.В. Чарнко, А.И. Тимченко // Вестн. машиностроения. — 1981. — № 1. — С. 33–35.
 17. Данилов, В.А. Анализ схем ротационного точения некруглых цилиндрических поверхностей / В.А. Данилов, А.Н. Селицкий // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. — 2006. — № 10. — С. 146–157.
 18. Данилов, В.А. Конструкторско-технологическое обеспечение применения профильных моментопередающих соединений в трансмиссиях машин / В.А. Данилов, А.И. Костюченко, С.В. Спиридонов // Машиностроение: сб. науч. тр. / под ред. И.П. Филонова. — Минск, 2001. — Вып. 17. — С. 209–214.
 19. Данилов, В.А. Общие принципы синтеза рациональных технологий формообразования сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов // Мир технологий. — 2003. — № 1. — С. 61–71.
 20. Данилов, В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов. — Минск: Выш. шк., 1995. — 264 с.
 21. Данилов, В.А. Оборудование и инструмент для обработки некруглых валов / В.А. Данилов, А.И. Костюченко, А.Н. Селицкий // Материалы, технология и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. трудов VI междунар. науч.-техн. конф.: в 3 т. / ПГУ; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. — Новополоцк, 2007. — Т. II. — С. 63–66.
 22. Данилов, В.А. Анализ и реализация схем формообразования поверхностей с синусоидальным профилем / В.А. Данилов, А.И. Костюченко, А.Н. Селицкий // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. В. — 2008. — № 2. — С. 30–37.

Kalinichenko A. S., Mardosevich H.I., Glazunova H.A.

Composite materials for sliding couples of mechatronics systems

Questions of development and creation of composite materials for sliding couples of the mechatronics systems of a precision equipment of precise electronic mechanical engineering are considered.

Поступил в редакцию 11.10.2016.