Keywords: theory and practice of gearing, tendencies of development, directions of advancement

Получено: 15.11.11

УДК 621.833.3

В. И. Гольдфарб, доктор технических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет
В. Н. Анферов, доктор технических наук, профессор
И. В. Сергеева, аспирант
Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск

ВАРИАНТЫ КОНСТРУКЦИЙ СПИРОИДНЫХ РЕДУКТОРОВ С РОТАПРИНТНОЙ СМАЗКОЙ ЗАЦЕПЛЕНИЯ

Представлены различные варианты конструктивного исполнения спироидных редукторов с ротапринтной смазкой зацепления. Приведены результаты экспериментальных исследований двух вариантов исполнения редукторов, подтвердившие возможность применения в экстремальных условиях.

Ключевые слова: спироидные редукторы, ротапринтная смазка, новые конструкторские решения

Введение

Одним из необычных проявлений прогресса техники и технологии является все более часто встречающиеся случаи работы механизмов в так называемых экстремальных условиях, когда привычные традиционные методы проектирования и конструирования не дают удовлетворительного результата. Достаточно сказать, что освоение космического пространства, освоение глубин мирового океана, активное развитие атомной энергетики и многие другие современные процессы поставили перед машиностроением и, в частности, редукторостроением задачи создания редукторов, в которых применение жидкой смазки недопустимо либо крайне нежелательно. Такие условия эксплуатации, очевидно, являются экстремальными, и подходы к проектированию и конструированию редукторов, работающих в этих условиях, должны гарантировано обеспечивать необходимые их технические характеристики.

В настоящей статье изложен некоторый, накопленный авторами опыт создания таких редукторов на основе спироидных передач. Выбор именно этих передач не случаен: имея достаточно существенные преимущества перед передачами других видов [1, 2, 3, 4 и др.], они находят все большее применение в различных отраслях техники, в том числе таких, где условия работы близки к экстремальным или являются таковыми. При этом геометрические особенности спироидных передач позволяют создавать уникальные конструкции редукторов. Ниже приведено описание трех вариантов исполнения указанных редукторов.

© Гольдфарб В. И., Анферов В. Н., Сергеева И. В., 2011

1. Спироидный редуктор с ротапринтной смазкой зацепления
(авторское свидетельство СССР № 838208)

Одной из интересных особенностей спироидных передач является возможность выполнения их двухвенцовыми [5] (рис. 1), состоящими из ведущего спироидного червяка и соосно размещенных по обе стороны от него и зацепляющихся с ним двух зубчатых венцов колеса. Если при этом одно из колес выполнить рабочим, передающим нагрузку, а другое изготовить из твердого смазочного материала и разместить указанный смазочный венец на подвижной ступице (как это сделано в [6]), перемещающейся под действием регулировочной пружины, то твердая смазка, покрывающая витки червяка во время взаимодействия их со смазочным венцом, будет переноситься в зону зацепления с передающим нагрузку венцом.

При проектировании такой передачи возникает задача рационального выбора зоны зацепления для каждого колеса с точки зрения их функционального назначения.

Известно, что условия скольжения в каждой из двух зон зацепления различны [7, 8], и очевидно, что для рабочей зоны зацепления, передающей нагрузку, предпочтительно меньшее скольжение (такое относительное расположение червяка и колеса называют основным [9]), а для смазывающей зоны – большее (вспомогательное относительное расположение).

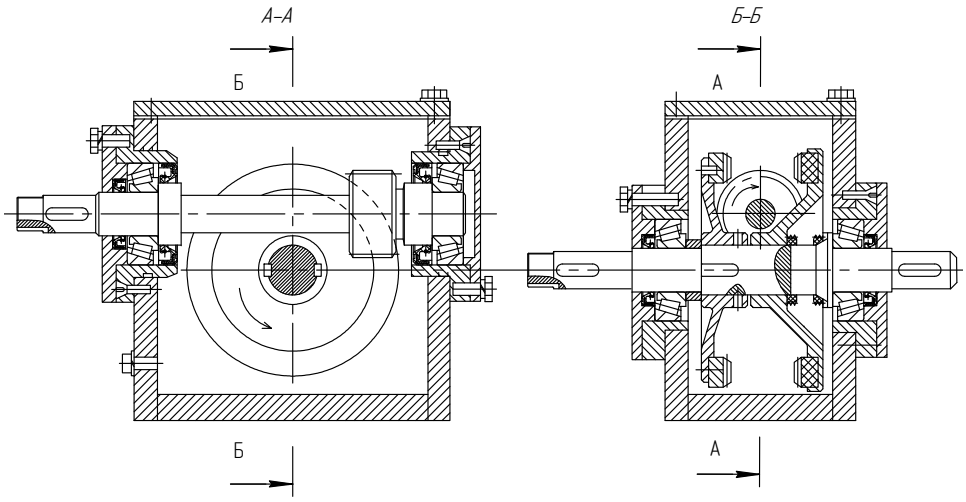

Рис. 1. Спироидный редуктор с ротапринтной смазкой зацепления

Очевидно, что для рабочей зоны зацепления, передающей нагрузку, предпочтительно меньшее скольжение – основное относительное расположение звеньев, а для смазывающей зоны – большее скольжение и соответственно вспомогательное относительное расположение. В связи с этим важно распознавать указанные зоны и соответствующим образом конструировать передачу.

Известен формальный алгоритм распознавания этих зон [10, 11]. Известно также правило их определения, сформулированное в [12] и наглядно проиллюстрированное соответствующими рисунками (рис. 2, 3). В частности, при основном

(вспомогательном) относительном расположении червяка и колеса – передача SZ (SZ-S) – при взгляде со стороны зубьев венца в направлении от оси колеса к точке пересечения межосевой линии с осью червяка последний располагается справа (слева), если линии витков у него правого направления, и слева (справа), если линии витков у него левого направления.

Приведенное правило позволяет однозначно решить вопрос целенаправленного выбора рабочей и смазывающей зон зацепления.

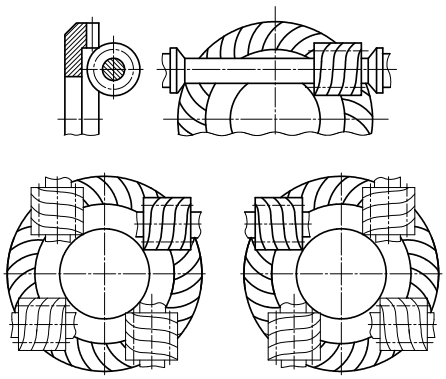

Рис. 2. Цилиндрическая спироидная передача (SZ) с основным расположением червяка и колеса

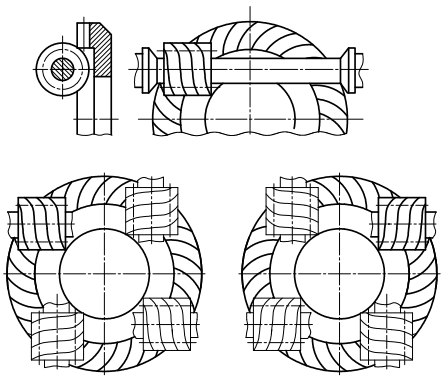

Рис. 3. Цилиндрическая спироидная передача (SZ-S) со вспомогательным расположением червяка и колеса

Выбор материала для венца смазывающего колеса имеет принципиальное значение, поскольку необходимо надежное образование пленки смазки на активных боковых поверхностях витков и переноса ее в зону зацепления передачи. В ходе эксперимента опробовано три материала для венца смазывающего колеса: фторопласт 4Т-1 ТУ6-05-810-71, графитопласт АМС-1 ТУ48-70-45-74 и графит АГ-150 ТУ48-20-3-77.

С целью проверки работоспособности и возможности применения редукторов с ротапринтным способом смазывания зацепления спироидных передач были проведены испытания редуктора в повторно-кратковременном режиме работы. Основные характеристики: межосевое расстояние спироидной передачи a_W = 40 мм; передаточное число u = 30; осевой модуль червяка m_X = 2,75 мм; материал венца колеса, передающего рабочую нагрузку БрА9Ж4; материал венца смазывающего колеса – фторопласт 4Т-1; материал червяка – сталь 40Х (HRCЭ 53-55, параметр шероховатости витков, Ra не более 0,32 мкм).

Испытания включали обкатку без нагрузки, ступенчатую обкатку и испытания с нагрузкой. Продолжительность испытаний составила 243 ч, момент на колесе был установлен равным 60 Н · м. Наблюдение за работой редуктора во время испытаний и осмотр поверхностей зубьев колес и витков червяка по окончании испытаний дают основания сделать заключение о его работоспособности. Редуктор работал плавно, без шума и вибрации. По окончании испытаний редуктор оставался пригодным к дальнейшей эксплуатации. Такое заключение подтверждается состоянием рабочих поверхностей зубьев и витков (рис. 4–6). Осмотр зубьев колеса, передающего нагрузку, выявил, что шероховатость боковой поверхности увеличилась до Ra ≈ 0,4 мкм и одинакова по всей поверхности контакта. Пятно контакта на по-

верхности составляет 95 %, задиры и вырывы металла с поверхностей зубьев отсутствуют. Износ зубьев колеса 0,05 мм.

Смазывающее колесо имело значительный износ (1,6 мм, Ra = 1,5…2,5 мкм).

Рис. 4. Витки червяка спироидной передачи с ротапринтной смазкой зацепления по окончании испытаний

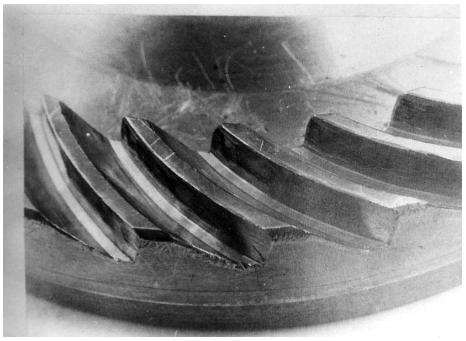

Рис. 5. Венец спироидного колеса редуктора с ротапринтной смазкой зацепления по окончании испытаний

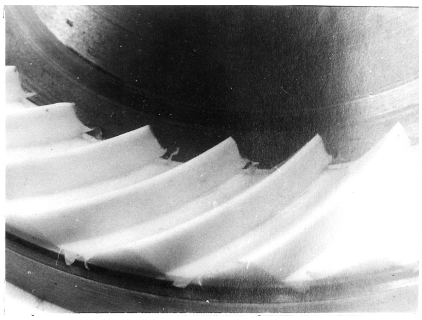

Рис. 6. Венец смазывающего колеса редуктора с ротапринтной смазкой зацепления по окончании испытаний

При осмотре спироидного червяка установлено, что контактировавшие поверхности витков хорошо приработались и имели равномерный износ не более 0,04 мм, задиров и царапин нет, шероховатость поверхности Ra ≈ 0,63 мкм.

Редукторы, собранные со смазывающими колесами из графитопласта АМС-1 и графита АГ-1500, не испытывались, т. к. они вышли из строя в обоих случаях из-за поломки зубьев смазывающих колес в режиме приработки.

Графитопласт АМС-1 и графит АГ-1500 из-за хрупкости не пригодны для изготовления венцов смазывающих колес, когда они образуют беззазорное зацепление с червяком. Проведенные исследования показали возможность реализации ротапринтного способа применительно к спироидной передаче. Установлено, что износ звеньев передачи, передающих нагрузку, незначителен, ресурс работы передачи лимитируется интенсивностью изнашивания зубьев смазывающего колеса.

Работоспособность редуктора может быть восстановлена путем замены смазывающего колеса. Нами найден другой путь увеличения ресурса спироидной передачи с ротапринтной смазкой зацепления [13].

2. Спироидный редуктор с ротапринтной смазкой

(авторское свидетельство СССР № 1118127)

Обратимся к рис. 7, на котором видно, что перемещение смазывающего колеса в направлении к червяку (показано стрелкой) ограничено. Действительно, в период работы передачи в направлении к червяку перемещение смазывающего колеса возможно на величину зазоров δ_1 и δ_2 . После наработки некоторого ресурса произойдет утонение зуба смазывающего колеса и контактирование вершин *3* и впадин *2* смазывающего колеса с вершинами *1* и впадинами *4* спироидного червяка. С этого момента не будет обеспечиваться надежное нанесение слоя смазки на витки червяка, поскольку на одной из его сторон в результате износа образуется боковой зазор в зацеплении со смазывающим колесом. Появление бокового зазора в зацеплении вызовет повреждение витков червяка и зубьев колеса, передающего нагрузку.

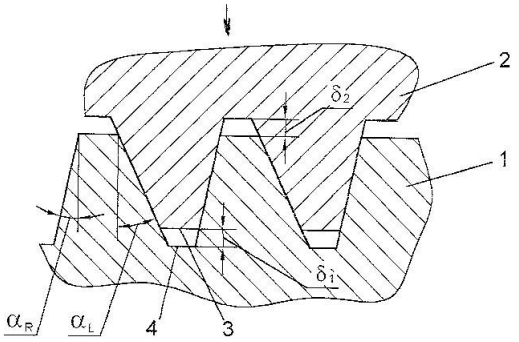

Рис. 7. Беззазорное зацепление смазывающего колеса с червяком в спироидной передаче с ротапринтным способом смазки

Чтобы обеспечить работоспособность редуктора с ротапринтной смазкой спироидной передачи после достижения предельной величины износа зубьев смазывающего колеса, нами предложено техническое решение [14], обеспечившее больший объем подаваемого в зону зацепления смазочного материала.

Для гарантированного получения зазоров δ_1 и δ_2 в случае соприкосновения вершин витков и впадин предусмотрено удаление материала со смазывающего колеса. Удаление материала во впадинах осуществляется зубьями, сформированными

на вершинах витков червяка, а вершин зубьев смазывающего колеса – при помощи ножа, неподвижно установленного внутри корпуса редуктора (рис. 8).

В момент достижения смазывающим колесом предельной величины износа зубьев наступает соприкосновение смазывающего колеса с зубьями червяка и ножом и происходит углубление впадин зубьев и срезание их вершин (рис. 9). Таким способом обеспечивается образование зазоров по вершинам витков и зубьев и, следовательно, беззазорное зацепление спироидного червяка и смазывающего колеса.

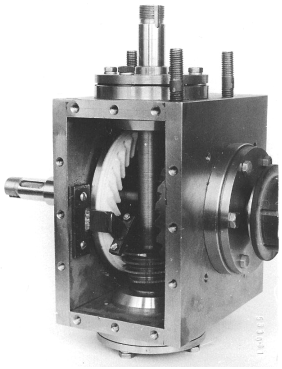

Рис. 8. Усовершенствованный вариант спироидной передачи с ротапринтной смазкой зацепления (а. с. 1118127)

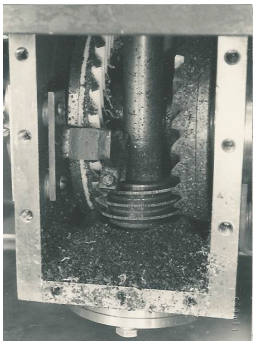

Рис. 9. Спироидный редуктор (а. с. 1118127) по окончании испытаний

Экспериментальная проверка предложенного устройства показала его эффективность. Ресурс передачи удалось увеличить в 2,8…3 раза.

3. Спироидный редуктор с ротопринтной смазкой зацепления

(патент на изобретение РФ № 2306465)

Третий вариант конструкции спироидного редуктора с ротапринтной смазкой зацепления показан на рис. 10, *а*. Идея здесь заключается в следующем [14].

Спироидная передача размещена в корпусе *1* и состоит из колеса *2* и червяка *3* (рис. 10, *а*). Устройство для смазки представляет собой выполненные в червяке винтовые канавки с размещенным в них твердым смазочным материалом, при этом направление канавок совпадает с направлением винтовой линии витков червяка, а угол φ их наклона выбирается из условия $\varphi = \kappa_\varphi \gamma$, где γ – угол наклона линии витков червяка, коэффициент κ_φ выбирается в диапазоне 1,75…3 для самотормозящейся спироидной передачи и κ_φ меньше 0,75 – для несамотормозящейся. При этом меньшим значениям γ соответствуют большие значения κ_φ. При таких условиях выдавливание твердой смазки из канавки не происходит, т. к. реакция R_n от нормальной силы в зацеплении (рис. 10, *б*) в момент контакта элементов передачи действует под углом к винтовой канавке нарезки, способствуя нанесению смазки на зубья колеса.

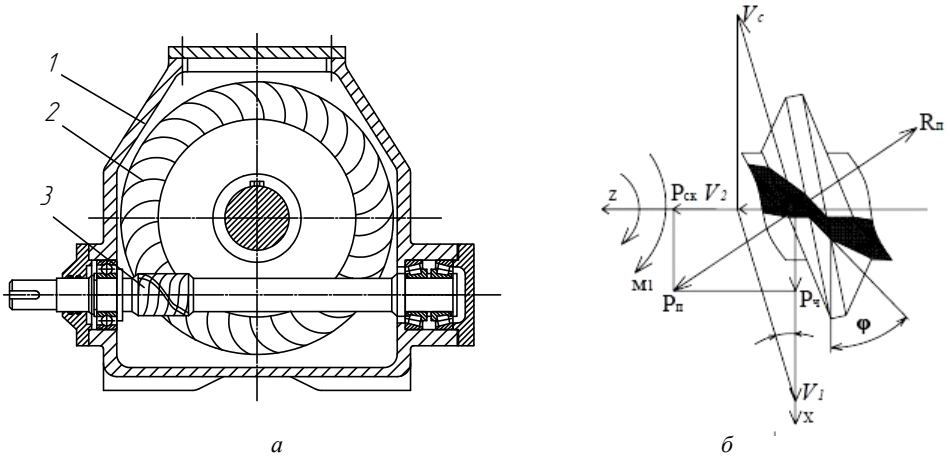

Рис. 10. Спироидная передача с ротапринтной смазкой зацепления

Особенностью передачи является то, что спироидное колесо выполнено из стали, а червяк – из антифрикционного материала, например бронзы или латуни. Интенсивность подачи смазки автоматически регулируется в зависимости от продолжительности работы пары трения, т. к. количество смазки, подаваемое в зону контакта, находится в прямой зависимости от интенсивности изнашивания витков червяка. При увеличении скорости вращения и нагрузочного момента на червяк увеличивается интенсивность истирания его витков (стальные зубья изнашиваются в гораздо меньшей степени) и, следовательно, истирания твердого смазочного материала, в результате чего осуществляется подача твердой смазки в зону контакта.

Заключение

Приведенная в статье информация о конструкциях трех вариантов спироидных редукторов с ротапринтной смазкой зацепления может быть использована при разработке приводов на основе спироидных передач в атомной, химической, пищевой, текстильной, космической и вакуумной технике, а также в условиях повышенных и низких температур.

Библиографические ссылки

1. *Nelson W. D*. Spiroid gearing, ASME, Paper #57-A-162, 1957.

2. *Goldfarb V. I*. What we know about spiroid gearing. Proceedings of the International Conference on Mechanical Transmissions, China, Vol. 1, Science Press, 2006, pp. 19–26.

3. *Георгиев А. К., Гольдфарб В. И.* Аспекты геометрической теории и результаты исследования спироидных передач с цилиндрическими червяками // Механика машин. – Вып. 31. – М. : Наука, 1971. – С. 70–80.

4. *Гольдфарб В. И., Анферов В. Н.* Перспективы применения спироидных передач в горном машиностроении // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосферы. – Т. 2. – Новосибирск : Машиностроение, 2007. – С. 113–116.

5. ГОСТ 22850–77. Передачи спироидные. Термины, определения и обозначения. – Введ. 1979–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 66 с.

6. А. с. 838208 СССР. Гиперболоидная зубчатая передача с ротапринтной смазкой зацепления / Георгиев А. К., Анферов В. Н., Езерская С. В. – Опубл. в Б. И., 1981, Бюл. № 22.

7. *Гольдфарб В. И., Несмелов И. П.* Выбор схемы неортогональной зубчатой передачи с перекрещивающимися осями // Известия вузов. Машиностроение. – 1982. – № 10. – С. 31–35.

8. *Гольдфарб В. И., Анферов В. Н.* Особенности выбора зон зацепления в спироидных передачах с ротапринтным способом смазки // Application of Mechanics and Biomechanics in Mechatronics. – Varna, Bulgaria, 1992. – С. 76–80.

9. ГОСТ 22850–77. Передачи спироидные. Термины, определения и обозначения.

10. *Гольдфарб В. И., Несмелов И. П.* Выбор схемы неортогональной зубчатой передачи с перекрещивающимися осями.

11. *Гольдфарб В. И., Анферов В. Н.* Особенности выбора зон зацепления в спироидных передачах с ротапринтным способом смазки.

12. ГОСТ 22850–77. Передачи спироидные. Термины, определения и обозначения.

13. А. с. 1118127 СССР. Гиперболоидная зубчатая передача с ротапринтной смазкой зацепления / Клюев Л. И., Анферов В. Н. – Опубл. в Б. И., 1984, Бюл. № 37.

14. Там же.

15. Пат. 2306465 Российская Федерация. Спироидная передача с ротапринтной смазкой зацепления / Анферов В. Н., Гольдфарб В. И., Ковальков А. А. – 2007.

***

V. I. Goldfarb, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University

V. N. Anferov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Siberian State Railway Transport University, Novosibirsk

I. V. Sergeyeva, Postgraduate Student, Siberian State Railway Transport University, Novosibirsk

Design Versions of Spiroid Gearboxes with Rotaprint Lubrication of Gearing

Different layout versions of spiroid gearboxes with rotaprint lubrication of gearing are presented. Results of experimental investigation of two versions of gearboxes layouts are given, proving the possibility of their application in extreme conditions.

Keywords: spiroid gearboxes, rotaprint lubrication, new design solutions.

Получено: 15.11.11

УДК 625.768.5

М. Ф. Закиров

В. П. Баранчик, доктор технических наук, профессор

Ижевский государственный технический университет

НОВЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ РЕЖИМОВ РАЗРУШЕНИЯ СНЕГА РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ МАШИН

Предлагается определять оптимальный угол резания снега рабочим органом машин на основе минимизации доли вертикальной составляющей в общем сопротивлении на рабочем органе. Приводится обоснование нового подхода с позиции теории предельных состояний упругих вязкопластичных сред и теории Мора.

Ключевые слова: угол резания, предельное напряженное состояние, круги Мора, предельная огибающая, угол трения, энергоемкость

Целый ряд материалов, к числу которых относятся грунты, снег, горные породы, многие композиты, обладают ярко выраженной анизотропностью. Ключевым параметром, влияющим на сопротивление разрушению любого материала под давлением штампа или резца, является трение. Угол внутреннего трения при сдвиге,

© Закиров М. Ф., Баранчик В. П., 2011