

УДК 621.833.3

A. B. Береснева, старший преподаватель;

A. A. Корнилов, инженер

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

МЕТОДИКИ, СХЕМЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ НЕОБРАТИМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ СПИРОИДНОЙ ПЕРЕДАЧИ

Описаны методы, схемы и оснащение для измерения необратимых изменений геометрии контактных поверхностей зубьев спироидной передачи, приведены некоторые результаты измерений до и после нагружения передачи.

Ключевые слова: спироидная передача, методика измерения, контактная поверхность

Введение

Практика многочисленных экспериментальных исследований и эксплуатации тяжело нагруженных (уровень контактных напряжений на зубьях 1 600 МПа и более) низкоскоростных спироидных редукторов приводов трубопроводной арматуры показывает, что при нагружении пар имеют место пластические деформации и приработочный износ. Оба этих явления способствуют увеличению площадок контакта, суммарного пятна контакта и выравниванию распределения нагрузки, что обеспечивает повышение нагрузочной способности передачи. Однако количественных данных, характеризующих указанные явления, в настоящее время нет. Кроме того, не существует и устоявшихся методик измерения величин указанных изменений. Многочисленные испытания спироидных редукторов показывают, что описанные ранее изменения контактных поверхностей необходимо разделять на две группы [1]:

1-я группа: пластические деформации зубьев и вершин неровностей на них (рис. 1, *a*), в основном происходящие за короткий промежуток времени (в течение первых же циклов нагружения);

2-я группа: изнашивание и пластические деформации (рис. 1, *б*), накапливающиеся в ходе длительной эксплуатации передачи.

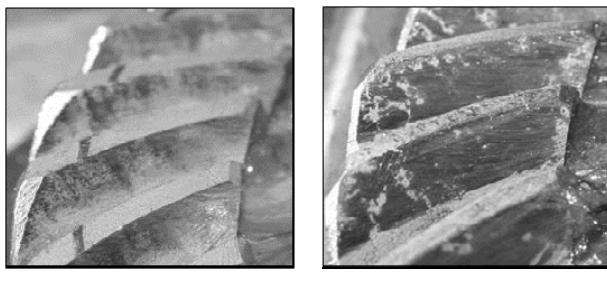


Рис. 1. Контактные поверхности зуба спироидного колеса: *а* – после 20 циклов; *б* – после 500 циклов нагружения

Процесс измерения геометрии осложняется криволинейностью профиля и особенностями пространственного расположения зубьев и витков спироидной передачи, что затрудняет использование большинства средств и схем, применяемых к звеньям передач других типов. Тем не менее, в настоящей работе

предложен ряд методик, в которых данная проблема решается благодаря комбинированию традиционных (синусная линейка, делительная головка, наборы плоскопараллельных концевых мер длины и т. п.) и современных электронных средств измерения (мобильная координатно-измерительная машина CimCore Infinity 2.0 и профилометр TR200).

Методы и схемы измерения 1-й группы

изменений контактных поверхностей

К изменениям данной группы в основном относят смятие или сглаживание вершин микронеровностей (шероховатости) и макронеровностей (огранки или волнистости).

Измерения микрогеометрии боковых поверхностей витков червяка

Измерение микрогеометрии витков производится в нескольких угловых положениях и в двух взаимно перпендикулярных направлениях: в радиальном (от впадины к вершине) и в тангенциальном (вдоль выбранной винтовой линии). При этом необходимо, чтобы контролируемое сечение поверхности максимально совпадало с прямолинейной траекторией движения измерительного щупа. Для измерения в радиальном направлении (рис. 2, *а*) необходимо отклонить червяк на угол, равный углу профиля измеряемой боковой поверхности витка с помощью синусной линейки и набора плоскопараллельных концевых мер длины (ППКМД). При измерении в тангенциальном направлении, дополнительно к углу профиля, необходимо учесть угол подъема винтовой линии червяка. Это достигается за счет поворота опорной площадки штатаива, на которой установлен профилометр (рис. 2, *б*).

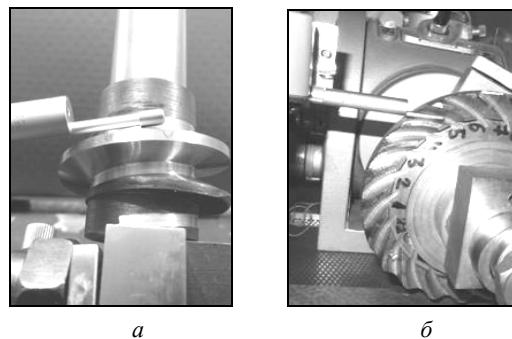


Рис. 2. Измерение микрогеометрии контактных поверхностей зубьев спироидной передачи (*начало*)



6

Рис. 2. Измерение микрогоиметрии контактных поверхностей зубьев спироидной передачи (окончание)

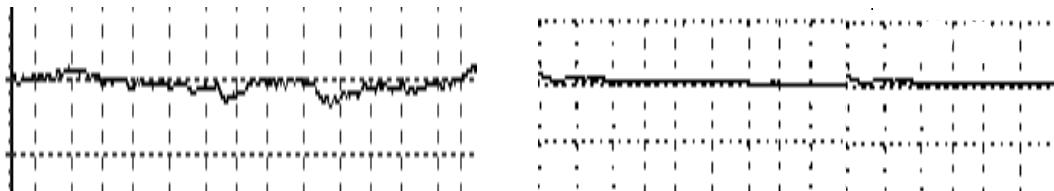


Рис. 3. Профилограмма левой боковой поверхности витка червяка исходной (слева), подвергнутой 10 циклам нагрузки (справа)

Измерения микрогоиметрии рабочих поверхностей колеса

Для измерения микрогоиметрии зубьев колеса по выпуклой (правой) боковой поверхности (рис. 2, 6) предлагается закреплять колесо на специальной оправке, установленной в центрах делительной головки. Оправка связывается поводковым устройством с ведущим центром, что обеспечивает плавный и управляемый поворот колеса и, следовательно, равномерный шаг измерений. Аналогично червяку колесо необходимо развернуть на угол, сопоставимый с величиной угла профиля зуба измеряемой боковой поверхности, для этого между основной базовой плоскостью колеса и опорным торцом измерительной оправки устанавливается соответствующий набор ППКМД. В предложененной схеме при последова-

тельном изменении взаимного положения профилометра и колеса практически всю боковую поверхность зуба в направлении продольных линий можно разбить на несколько условно прямолинейных участков, получив профилограммы которых, микрогоиметрия зуба будет определена.

Для прямого измерения вогнутой (левой) поверхности зуба профилометром TR200 доступны лишь небольшие участки в области пятки и носка. Эта проблема решается путем изготовления слепков сложных для измерения поверхностей. В нашем случае из смеси, в состав которой входят сера и графит, выполняется слепок левой боковой поверхности, который после отвердения устанавливается на пластичное основание, выверяется и подвергается измерениям.

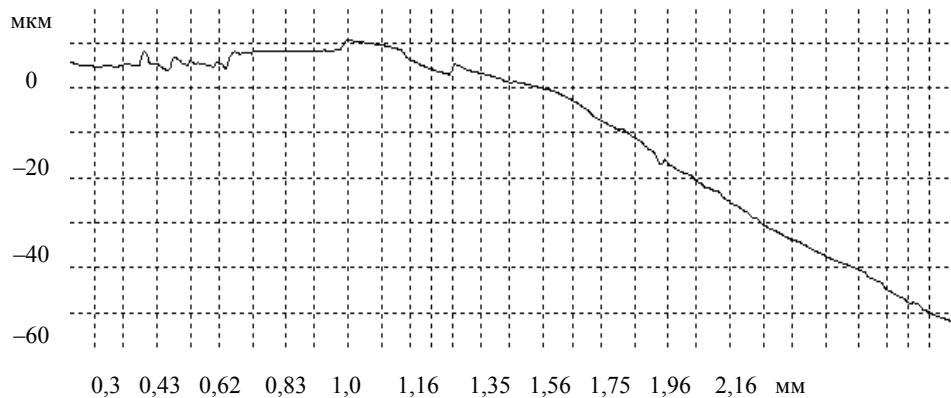


Рис. 4. Профилограмма с фрагментом огранки на правой боковой поверхности зуба спироидного колеса

Зубья спироидного колеса, в отличие от витков червяка, как правило, имеют заметную огранку. Для проверки достоверности полученных результатов в отношении величины и формы огранки (рис. 4) неко-

торые поверхности колеса измерялись еще и на координатно-измерительной машине (рис. 7 и 8), подробнее об этом будет сказано ниже.

Измерения 2-й группы изменений контактных поверхностей

Напомним, что к изменениям данной группы относятся накопленные пластические деформации и изнашивание спироидных зубьев и витков, значения которых могут превышать 0,1 мм, особенно у колеса, что ограничивает возможности использования профилометра. Тем не менее, при помощи TR200 можно производить оценку изменений контактных поверхностей на малонагруженных участках и участках, близлежащих к границам пятна контакта. Пример такого участка профиля витка червяка изображен на рис. 5, где на профилограмме можно зафиксировать изменения геометрии на переходе от нерабочей поверхности к поверхности, подвергнутой нагрузению.

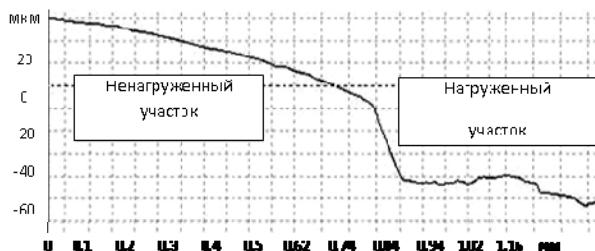


Рис. 5. Участок левой боковой поверхности витка червяка

Измерения макрогоеометрии профиля витков червяка

Для измерения боковых поверхностей витков червяка применяется универсальный микроскоп УИМ-21. Методика предполагает измерение координат точек осевого профиля червяка на определенных радиусах до и после испытаний. При дополнительном использовании индексного отверстия червяка, специальной оправки и набора ППКМД обеспечивается повторяемость координат в осевом направлении и в нескольких фиксированных угловых положениях. Многократные тестовые измерения подтвердили повторяемость результатов в пределах $\pm 0,003$ мм. Кроме того, можно сравнить соответствующие результаты измерения на микроскопе и профилометре, чтобы подтвердить их корректность. Так, на профилограмме (рис. 5) видно, что износ и пластические деформации боковой поверхности витка червяка составляют примерно 0,020 мм, сопоставление разницы координат того же участка профиля, измеренных на микроскопе, дает результат, равный 0,017 мм.

Измерение зубьев спироидного колеса на координатно-измерительной машине

Форма спироидного зуба имеет ряд особенностей, а именно: непостоянство угла профиля и толщины, невозможность описания характерных линий рабочих поверхностей простыми аналитическими зависимостями, учитывая это, использовать средства и схемы измерения, предназначенные для других типов колес, оказалось проблематичным. Хорошим выходом из сложившейся ситуации является применение координатно-измерительных машин, которые

позволяют проводить сравнение геометрических 3D моделей с реальными объектами.

Принимая во внимание габариты колес, а также результаты предварительных измерений и расчетов, прогнозируемая величина изменения формы и размеров зуба, по мнению авторов, может достигать десятых долей миллиметра. Для выполнения измерений величин такого порядка может применяться семиосевая мобильная измерительная машина CimCure Infinity 2.0 с программным обеспечением PowerINSPECT компании Delcam, которая при контактном методе позволяет обеспечить требуемую объемную точность. Модель спироидного колеса построена с помощью систем SPDIAL+ [2] и Компас-3D (АСКОН).

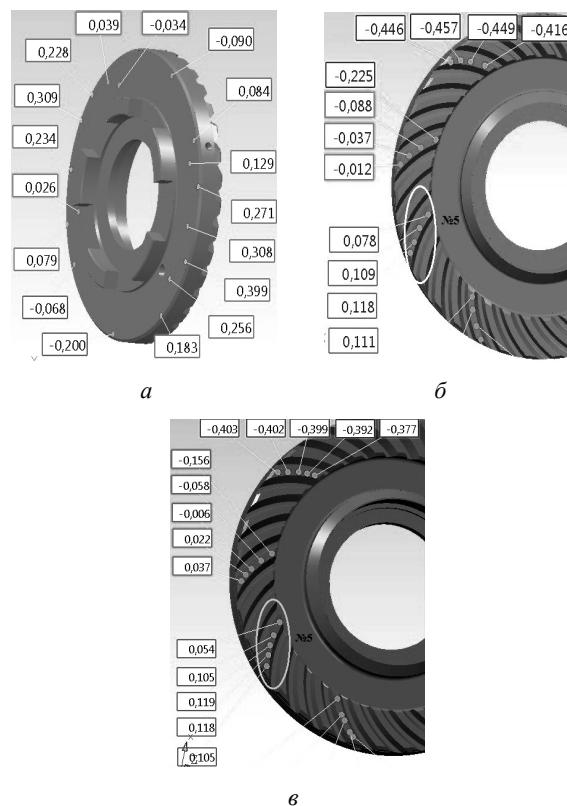


Рис. 6. Комплект точек на базовом торце (а), обеспечивающий повторяемость координат вершин измеряемого зуба № 5 до (б) и после (в) испытаний

В предлагаемой методике для обеспечения необходимой точности измерений требуется соблюдение двух условий. Во-первых, схема базирования, а точнее, совмещения координат реального зубчатого колеса и его 3D модели, должна обеспечивать повторяемость результатов на разных стадиях испытаний. С этой целью в конструкцию колеса были внесены два конических отверстия, расположенные на наружном цилиндре под углом 180°, которые обеспечивают постоянство углового совмещения детали и модели относительно оси колеса. Другими базовыми элементами приняты опорная плоскость колеса и наружный цилиндр, выполненный соосно основной конструкторской базе и не подвергнутый износу. Некоторые изменения опорной плоскости колеса,

которые возникают при эксплуатации, легко скомпенсировать фильтрацией измеренных точек, которые определяют положение детали в системе координат машины. Отбор точек необходим еще и потому, что отклонение от плоскостности базового торца колеса после термообработки может достигать 0,5 мм (рис. 6, а), и только вышеуказанная фильтрация обеспечивает повторяемость координат вершин измеряемых зубьев на разных стадиях измерений (рис. 6, б и 6, в), что является одним из признаков точности предложенной методики.

Вторым условием для выявления характера и величины изменений геометрии зуба является получение значений отклонений от модели в точках с неизменным радиусом и осевой координатой. Так как PowerINSPECT предоставляет возможность проведения измерений в сечениях модели плоскостями, было принято решение измерять боковые поверхности зубьев в направлении характерных линий – продольных линий зуба (рис. 7 и 8), лежащих в плоскостях, перпендикулярных оси колеса. Но, к сожалению, применение манипулятора CimCore Infinity 2.0 не обеспечивает регулярного по радиусу расположения точек в измеряемых сечениях. Поэтому был разработан алгоритм и на его основе программное обеспечение, позволяющее преобразовывать отклонения от модели в нерегулярно расположенных точках, полученных из файла отчета PowerINSPECT, в регулярный по радиальной координате массив, а также автоматизировать процесс обработки, сопоставления и представления полученной информации [3]. Диаграммы, представленные на рис. 7 и 8, построены с использованием указанной программы.

В соответствии с предложенной методикой выполнены измерения нескольких колес. Полученные результаты (некоторые из них приведены на рис. 7 и 8) подтверждают возможность и целесообразность ее

применения. Например, повторяемость отклонений после переустановки не выходит за пределы $\pm 0,022$ мм (рис. 7, а и 7, б), что не превышает погрешности измерительной машины.

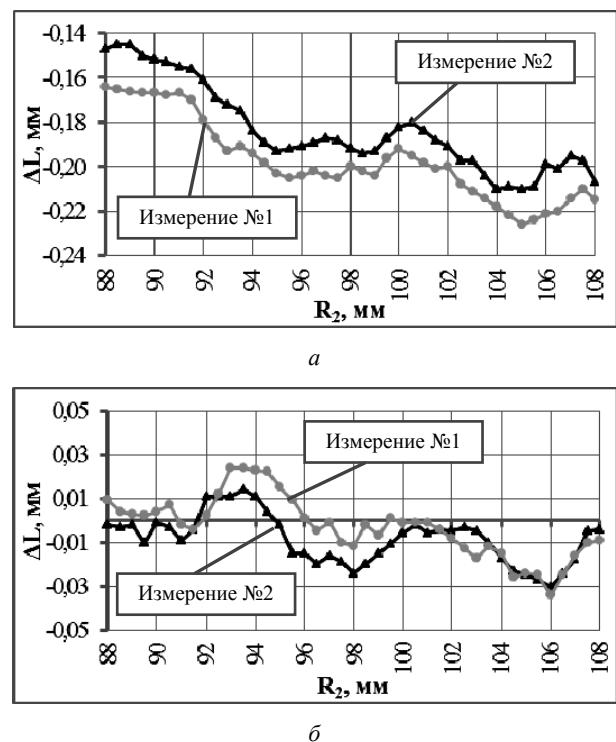


Рис. 7. Повторяемость результатов измерения продольных линий зуба спироидного колеса: а – правая поверхность; б – левая поверхность

На рис. 8 приведен пример изменения геометрии продольной линии зуба колеса после непродолжительных испытаний под нагрузкой.

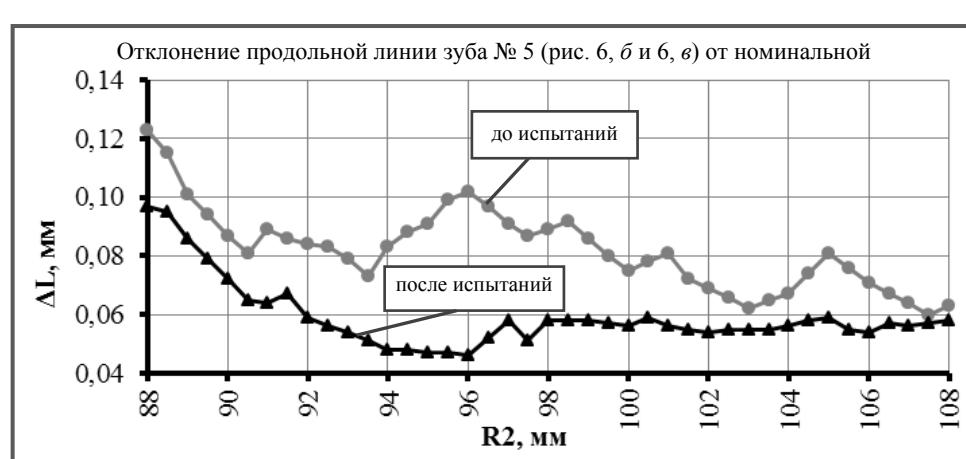


Рис. 8. Результаты измерений продольной линии зуба до и после испытаний

Заключение

Рассмотренные в работе методики и схемы измерения позволяют определить эволюцию микротипографии контактных поверхностей зубьев червяка и колеса спироидной передачи с необходимой точностью. Кроме того, некоторые из методик

могут применяться и в других работах, требующих сложных измерений, например, в исследованиях, связанных с влиянием термообработки или деформации и износа фрезы на точность спироидных колес.

Библиографические ссылки

1. Кузнецов А. С., Корнилов А. А. Об учете необратимых изменений контактных поверхностей спироидных передач низкоскоростных тяжело-нагруженных редукторов // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. – 2012. – № 4. – С. 21–25.

2. Программный комплекс исследования и проектирования спироидных передач / Е. С. Трубачев, А. Г. Бажин, А. В. Береснева и др. // Редукторостроение России: состояние, проблемы, перспективы : тр. Всерос. науч.-практ.

конф. с междунар. участием, 28–31 мая 2002 г., г. Санкт-Петербург. – СПб., 2002.

3. Береснева А. В., Пастухов К. Е., Бажин А. Г. Анализ эволюции рабочих поверхностей зубьев спироидных колес с использованием программного обеспечения Delcam PowerINSPECT // Информационные технологии DELCAM в образовании и научных исследованиях : докл. 3-й Междунар. науч.-техн. конф. – Севастополь : СевНТУ, 2012. – URL: <http://edisk.ukr.net/?do=dir&#cdir=i1747016> (дата обращения: 15.03.2013).

* * *

A. V. Beresneva, Senior Lecturer, Kalashnikov Izhevsk State Technical University
A. A. Kornilov, Engineer, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Methods, schemes and means of measuring the irreversible changes in spiroid flank contact

Methods, schemes and equipment of measuring the irreversible changes in spiroid flank contact are described. Some results of measurements before and after loading are presented.

Keywords: спироидная передача, измерительный метод, контактная поверхность

Получено: 25.04.14

УДК 621.833

M. O. Верещагин, соискатель
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СПИРОИДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ ПРИ МАЛОМ ПЕРЕДАТОЧНОМ ОТНОШЕНИИ

Рассмотрены вопросы проектирования спироидных передач с малыми (менее 10) передаточными отношениями, исследования влияния их параметров на геометрико-кинематические показатели зацепления и рационального выбора указанных параметров.

Ключевые слова: спироидная передача, проектирование передач, геометрические ограничения

Введение

Для спироидных передач, разработка, исследование, внедрение которых в различные отрасли промышленности выполняются уже много лет, вопросы выбора рациональных геометрических параметров при предпочтительных для этих передач значениях передаточных отношений в диапазоне $i = 20\dots60$ рассмотрены в достаточно большом количестве публикаций [1–3 и др.].

Область эффективного применения этих передач может быть заметно увеличена за счет расширения диапазона реализуемых передаточных отношений в сторону их уменьшения до 6…8 и менее. Однако это требует создания нового подхода к выбору параметров, отличного от известного, ставшего традиционным, поскольку при малых значениях i резко возрастают опасности подрезания и заострения зубьев колеса и поднутрения и заострения витков червяка. Первые попытки разработки такого подхода изложены в [4]. В настоящей работе приводятся результаты последующего исследования геометрии и кинематики спироидных цилиндрических передач с малыми передаточными отношениями.

Принципиальная схема проектирования идеальной спироидной передачи

Сразу оговоримся – под идеальной спироидной передачей здесь понимается передача без учета факторов, действующих в реальном зацеплении (погрешности изготовления и монтажа, деформации звеньев, модификации зацепляющихся элементов и др.).

На рис. 1 и 2 показаны соответственно схема ортогональной спироидной цилиндрической передачи и процесс синтеза ее сопряженного зацепления [3]. Приведенные на рис. 1 параметры определяют общие габариты передачи. Здесь d_{e2} (внешний диаметр колеса) = $k_{e2}a_w$, d_{a1} (диаметр вершин витков червяка) = $k_{a1}a_w$, где k_{e2} и k_{a1} – коэффициенты соответствующих диаметров, P – полюсная точка с координатой z_p вдоль оси червяка, положение которой определяет осевой модуль витков червяка $m_x = 2a_w/[z_1(1-2z_p/d_{a1})]$ [5], где z_1 – число заходов червяка, B_1 и b_1 – удаление червяка от межосевой линии и длина его нарезанной части соответственно.

Расчет геометрии червяка и колеса включает выбор вида червяка и геометрии его витков. Моделирование геометрии и кинематики зацепления включает расчет таких характеристик, как коэффициент перекрытия ε , суммарная длина контактных линий l_Σ , приведенные радиусы кривизны $\rho_{\text{пр}}$, скорость сколь-