

Пастухов А.Г.,¹

Тимашов Е.П.²

¹ ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ,
г. Белгород,
e-mail: pastukhov_ag@mail.ru

² АНО ВО «Белгородский университет
кооперации, экономики и права»,
г. Белгород,
e-mail: timachov@mail.ru

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ КАРДАННЫХ ШАРНИРОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОАПРЯЖЕННОСТИ

УДК 631.3:621.825.6

В работе представлена гипотеза о применении измерений теплонапряженности карданных шарниров для оценки их технического состояния. Приведена модель теплонапряженности поверхностного слоя для рабочих поверхностей подшипниковых узлов карданных шарниров. Показана необходимость применения системного подхода для оценки надежности карданных шарниров по параметрам теплонапряженности в эксплуатации.

Ключевые слова: надежность, карданный шарнир, теплонапряженность, диагностика.

Постановка проблемы

Оценка надежности транспортных и технологических машин является важной задачей. Современный уровень развития инженерного дела позволяет эффективно производить диагностику и оценку надежности агрегатов машин, снабженных системами самодиагностики (электронные системы управления двигателем, автоматической коробкой передач, механизмами самоходных уборочных машин и т.д.). В тоже время большое число узлов и агрегатов машин диагностировать можно только в процессе работы. Например, уровень износа подшипников качения можно определить только при их работе под нагрузкой. Подобные узлы трансмиссии могут ограничивать надежность машины целиком, а замена отказавших узлов достаточно трудоемка. В этой связи, плановый мониторинг технического состояния узлов трансмиссии позволит минимизировать затраты на ремонт техники и убытки от ее простоя.

Объективные причины позволяют диагностировать техническое состояние узлов трансмиссии при их работе только с применением методов диагностирования по параметрам сопутствующих процессов – вибрация, нагрев. Для диагностики подшипников качения традиционно применяется метод вибродиагностики [1]. Однако, например, к карданным шарнирам такой метод неприменим, вследствие конструктивных особенностей и того факта что их подшипниковые узлы во время работы вращаются относительно оси карданного вала. Для диагностики карданных шарниров целесообразно применять тепловые методы диагностики.

Анализ последних исследований и публикаций

Известны работы исследователей и практиков в области надежности карданных передач привода сельскохозяйственных машин, в которых авторы рекомендуют осуществлять оценку и прогнозирование надежности изделий по скорости изнашивания и удельным давлениям рабочей поверхности деталей.

В частности, коллективом авторов под руководством доц. Клименко Н.П. исследованы классификация и конструктивных особенности карданных передач транспортных машин, и выполнен анализ конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, влияющих на долговечность карданных передач [2, 3].

Рабочей группой исследователей под руководством проф. Кухтова В.Г. выполнена оценка влияния особенностей эксплуатационных режимов, изучены конструктивные особенности и факторы, определяющие надежность карданных передач, а также выполнена оценка напряженно-деформированного состояния карданных передач привода сельскохозяйственных машин [4, 5, 6].

Из теории механики известно, что в процессе эксплуатации изделий машиностроения в них возникают физические эффекты, обусловленные механическим взаимодействием деталей по рабочим поверхностям, что приводит к возникновению очаговых зон вибрационных и температурных процессов. Таким образом, изучение физических процессов повышения вибро- и теплонапряженности рабочих поверхностей элементарных соединений агрегатов механических трансмиссий представляют широкий научный и практический интерес при разработке технологий и технических средств диагностирования технического состояния соединений на примере карданных передач.

Цель исследования - установить теоретические зависимости между параметрами рабочих процессов карданных шарниров на основе анализа теплового режима;

Основной материал исследований

Реализация метода диагностики карданных шарниров по параметрам тепловыделения вызывает существенные затруднения. Выделяемое количество теплоты пропорционально работе трения в подшипниковых узлах карданного шарнира, и, на первый взгляд, позволяет судить об их техническом состоянии. Однако конструктивные, технологические и эксплуатационные характеристики карданных шарниров, а также сопряженных тепловыделяющих узлов не позволяют дать объективную оценку технического состояния только карданных шарниров.

Сущность температурного эффекта при трении заключается в непрерывном превращении механической энергии в тепловую. Теплота распространяется из пятен контакта вглубь материала трущихся деталей. Затруднения в расчетах температурного поля возникают по причине теплоотдачи в окружающую среду и трудностью определения граничных условий. Исследователи [7] выделяют несколько температур, характеризующих тепловыделение:

- температура трения (возникает в зоне трения);
- объемная температура (возникает ниже зоны деформаций);
- контактная температура (возникает в точках контакта);
- поверхностная температура (возникает на поверхности в точках, где нет контакта).

Поверхностная и контактная температура объединяются термином «граничная температура».

Гипотеза о критической температуре разрушения смазочного слоя позволяет выявить характерный критерий – температурную вспышку. Температурная вспышка проявляется в быстром приращении температуры при механическом заедании и интенсивном износе. Условием отсутствия заедания по Г. Блоку является следующее: сумма установившейся температуры и температуры вспышки не должна превышать суммарную критическую температуру [8]. Для различных комбинаций материалов трущихся деталей и смазочных материалов суммарная критическая температура составляет 100...350 °С.

Значение суммарной критической температуры использовалось исследователями для определения наступления предельного состояния карданных шарниров при проведении ресурсных испытаний [9]. Опытным путем было установлено, что при наступлении

предельного состояния одного из подшипниковых узлов карданного шарнира температура доньшка стакана подшипникового узла составляет 80 °С, что соответствует температуре в зоне трения 200...250 °С.

Применительно к карданным шарнирам задачи теплонапряженности рассматривались в работе М.И. Лысова [10]. Автор предлагает оценку теплонапряженности на основании прироста температуры карданного шарнира относительно окружающей среды при условии установившегося теплового баланса карданного шарнира. В работе описывается значение предела температурной пропорциональности, как величины зависящей от одного из параметров режима работы карданного шарнира (крутящего момента, частоты вращения, угла излома), при котором наблюдается резкое повышение температуры. Приведенные в работе результаты испытаний позволяют использовать оценку температуры карданного шарнира для его диагностирования.

Адаптация системного подхода к изучению температурного режима карданных шарниров возможна при условии разработки моделей теплонапряженности для трех иерархических уровней [11].

На первом уровне выявляются закономерности процессов тепловыделения элементарными сопряжениями подшипниковых узлов карданного шарнира.

Второй уровень предусматривает оценку тепловыделения и рассеивания теплоты в конструкции карданного шарнира.

На третьем уровне рассматривается работа карданного шарнира в составе трансмиссии с учетом влияния сопряженных тепловыделяющих агрегатов.

На первом иерархическом уровне элементарные тепловыделяющие сопряжения карданного шарнира представляют основной интерес исследований. Характерной температурой в этом случае можно считать среднюю температуру нагрева поверхностного слоя при трении [7]

$$\Theta_1 = \frac{\delta f K_\sigma V}{I \left(\lambda \sqrt{\frac{\alpha U}{\lambda S_c}} + k_n \rho c \cdot 2,6 \frac{\sqrt{a}}{\lambda_d} \sqrt{V} \right)}, \quad (1)$$

где Θ_1 – средняя температура нагрева поверхностного слоя; δ – коэффициент распределения теплоты между трущимися телами; f – коэффициент трения; K_σ – давление контакта; V – скорость скольжения; I – механический эквивалент теплоты; λ – теплопроводность; α – коэффициент теплоотдачи поверхности; U – периметр сечения трущегося тела; S_c – площадь сечения трущегося тела; k_n – коэффициент пропорциональности; ρ – плотность материала; c – удельная теплоемкость; a – коэффициент температуропроводности; λ_d – длина волны неровностей на трущейся поверхности.

Приведенная аналитическая модель позволяет обосновать диагностический параметр - температуру поверхностного слоя при трении для элементарного сопряжения. Однако данная температура не может служить диагностическим параметром ввиду сложностей ее измерения.

Второй иерархический уровень предполагает оценку комплекса тепловыделения всеми элементарными сопряжениями карданного шарнира с учетом количества рассеянной теплоты

$$\Theta_2 = f(\Theta_1; W_p), \quad (2)$$

где Θ_2 – температура на внешних поверхностях карданного шарнира; n – количество тепловыделяющих сопряжений; W_p – рассеиваемая теплота.

Фактически температура наружных поверхностей карданного шарнира имеет наибольшую практическую применимость для оценки технического состояния карданного шарнира. Однако, характеристика тепловыделения узлов, сопряженных с карданным шарниром, может оказывать существенное влияние на результаты оценки.

Третий иерархический уровень учитывает влияние тепловыделения сопряженных тепловыделяющих узлов

$$\Theta_3 = f(\Theta_2; W_6), \quad (3)$$

где W_6 – теплота от сопряженных узлов тепловыделения.

Последний из приведенных параметров может оказывать значительное влияние на результаты диагностирования карданных шарниров, вплоть до полной недостоверности оценки по причине повышенного тепловыделения сопряженного узла, а не карданного шарнира.

Анализ зависимости (1) показывает, что основные факторы нагрузочных режимов карданных шарниров: крутящий момент, частота вращения и угол излома учтены в значениях переменных K_σ – давление контакта и V – скорость скольжения. Данный факт позволяет дать аналитическую оценку средней температуры поверхностного слоя в зависимости от нагрузочных режимов и конструктивных параметров.

Зависимости (2) и (3), представленные виде функционалов нуждаются в дальнейшем изучении для выявления аналитической зависимости между фактическим тепловыделением в элементарных сопряжениях и поверхностной (диагностической) температурой карданного шарнира в эксплуатационных условиях.

Выводы

На основании представленных выше соображений можно сделать следующие обобщения.

1. Проведенное исследование позволило выявить проблему использования температуры карданного шарнира в качестве диагностического параметра оценки надежности.
2. Решение проблемы заключается в выявлении аналитической зависимости между фактическим тепловыделением в элементарных сопряжениях и поверхностной (диагностической) температурой карданного шарнира в эксплуатационных условиях.
3. На основании полученных моделей теплонапряженности карданных шарниров предполагается разработать новые методы и технические средства диагностирования карданных шарниров, ориентированные на оценку их теплонапряженности.

Литература

1. Чернова Г.А., Синьков А.В. Сторчилова Т.А. Исследование вибрационных характеристик карданной передачи автобуса «Волжанин-4298» на холостых оборотах и на первой передаче. // Известия ВолгГТУ 2013. т. 7 №21(124) С. 44 – 47.
2. Клименко, Н.П. Анализ надежности конструкций карданных передач и карданных шарниров транспортных средств / Н.П. Клименко, А.А. Концевич, Д.А. Дудка и др. // Вестник ХНТУСХ им. Петра Василенка. – 2010. – Вып. 93. – С.
3. Клименко, Н.П. Анализ факторов, влияющих на долговечность карданных передач транспортных средств / Н.П. Клименко, В.Л. Литвиненко, О.А. Концевич и др. // Вестник ХНТУСХ им. Петра Василенка. – 2010. – Вып. 100. – С. 141-146.
4. Кухтов, В.Г. Влияние особенностей эксплуатационных режимов на надежность кар-

- данных передач привода сельскохозяйственных машин / В.Г. Кухтов, О.С. Гринченко, А.А. Фимун и др. // Вестник ХНТУСХ им. Петра Василенка. – 2011. – Вып. 114. – С. 258-263.
5. Кухтов, В.Г. Конструктивные особенности и факторы, определяющие надежность карданных передач сельскохозяйственных машин / В.Г. Кухтов, О.С. Гринченко, О.И. Алферов и др. // Вестник ХНТУСХ им. Петра Василенка. – 2011. – Вып. 110. – С. 29-35.
 6. Кухтов, В.Г. Оценка напряженно-деформированного состояния карданной передачи привода сельскохозяйственных машин / В.Г. Кухтов, А.А. Фесун, М.А. Шевченко и др. // Вестник ХНТУСХ им. Петра Василенка. – 2011. – Вып. 128. – С. 219-225.
 7. Лукьянец В.А. Физические эффекты в машиностроении: Справочник / В.А. Лукьянец, З.И. Алмазова, Н.П. Бурмистрова и др. Под общ. ред. В.А. Лукьянца. – М.: Машиностроение. 1993. – 224 с.
 8. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин: Учеб. пособие для машиностр. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.
 9. Методика ускоренных испытаний карданных передач сельскохозяйственных машин. Руководящий технический материал РТМ 23.2.74-79. - М.: ВИСХОМ, 1980. - 40 с.
 10. Лысов, М.И. Карданные механизмы / М.И. Лысов. - М.: МАШГИЗ, 1945. - 160 с.
 11. Терехов, А.С. Системный подход к исследованию температурного режима агрегатов трансмиссии / А.С. Терехов // Автомобильная промышленность. - № 8. - 1979. - С. 21-23.

Summary

Pastukhov A.G., Timashov E.P. Assessment of the reliability of universal joints on the basis of analytical models of thermal stresses

Based on the analysis of existing studies and publications in the field of reliability of cardan gear set, that the existing methods and technical means do not give a reliable estimate of the technical condition of u-joints in transmissions of transport and technological machines. It is shown that the estimation of influence of constructive, technological and operational factors on the reliability of the cardan gear is based on a lack of modern technologies of diagnostics, it is therefore proposed to specify the criterion of failure of universal joints according to the parameters of thermal stress. The work extended and developed the hypothesis that the use of measurements of the calorific intensity of the u-joints to assess their technical condition. The model of thermal stress of the surface layer to the working surfaces of the bearing assemblies universal joints. The necessity of a systemic approach to assess the reliability of universal joints on the parameters of the thermal stress in operation.

Keywords: reliability, universal joint, heat release rate, diagnosis.

References

1. Chernova G.A., Sin'kov A.V., Storchilova T.A. Issledovanie vibracionnyh harakteristik kardannoj peredachi avtobusa «Volzhanin-4298» na holostykh oborotah i na pervoj peredache. // Izvestija VolgGTU 2013. t. 7 №21(124) S. 44 – 47.
2. Klimenko, N.P. Analiz nadezhnosti konstrukcij kardannyh peredach i kardannyh sharnirov transportnyh sredstv / N.P. Klimenko, A.A. Koncevich, D.A. Dudka i dr. // Vestnik HNTUSH im. Petra Vasilenka. – 2010. – Vyp. 93. – S.

3. Klimenko, N.P. Analiz faktorov, vlijajuwih na dolgovechnost' kardannyh peredach transportnyh sredstv / N.P. Klimenko, V.L. Litvinenko, O.A. Koncewich i dr. // Vestnik HNTUSH im. Petra Vasilenka. – 2010. – Vyp. 100. – S. 141-146.
4. Kuhtov, V.G. Vlijanie osobennostej jekspluacionnyh rezhimov na nadezhnost' kardannyh peredach privoda sel'skohozjajstvennyh mashin / V.G. Kuhtov, O.S. Grinchenko. A.A. Fimun i dr. // Vestnik HNTUSH im. Petra Vasilenka. – 2011. – Vyp. 114. – S. 258-263.
5. Kuhtov, V.G. Konstruktivnye osobennosti i faktory, opredeljajuwие nadezhnost' kardannyh peredach sel'skohozjajstvennyh mashin / V.G. Kuhtov, O.S. Grinchenko, O.I. Alferov i dr. // Vestnik HNTUSH im. Petra Vasilenka. – 2011. – Vyp. 110. – S. 29-35.
6. Kuhtov, V.G. Ocenka naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija kardannoј peredachi privoda sel'skohozjajstvennyh mashin / V.G. Kuhtov, A.A. Fesun, M.A. Shevchenko i dr. // Vestnik HNTUSH im. Petra Vasilenka. – 2011. – Vyp. 128. – S. 219-225.
7. Luk'janec V.A. Fizicheskie jeffekty v mashinostroenii: Spravochnik / V.A. Luk'janec, Z.I. Almazova, N.P. Burmistrova i dr. Pod obw. red. V.A. Luk'janca. – M.: Mashinostroenie. 1993. – 224 s.
8. Kogaev V.P., Drozdov JU.N. Prochnost' i iznosostojkost' detalej mashin: Ucheb. posobie dlja mashinostr. spec. vuzov. – M.: Vyssh. shk., 1991. – 319 s.
9. Metodika uskorenyh ispytanij kardannyh peredach sel'skohozjajstvennyh mashin. Rukovodjawij tehničeskij material RTM 23.2.74-79. - M.: VISHOM, 1980. - 40 s.
10. Lysov, M.I. Kardannye mehanizmy / M.I. Lysov. - M.: MASHGIZ, 1945. - 160 s.
11. Terehov, A.S. Sistemnyj podhod k issledovaniju temperaturnogo rezhima agregatov transmissii / A.S. Terehov // Avtomobil'naja promyshlennost'. - № 8. - 1979. - S. 21-23.