

трехступенчатого двухпоточного пакетного редуктора на двух валах с передаточным отношением  $U_{\Sigma}=64$ .

2. Проведены промышленные испытания редуктора на станке-качалке СКД 3-1,5-710 на нефтепромысле острова Пираллахы, вблизи Баку, на скважине глубиной 850 метров.

3. По своим техническим параметрам редуктором полностью соответствует нормативам заказчика – SOCAR – и удовлетворил все его требования по нефтедобыче, надежности и работоспособности.

4. Редуктор был рекомендован для дальнейшего производства с целью использования на станках-качалках.

**Список литературы:** 1. *Абдуллаев А.И., Наджафов А.М.* Трехступенчатый двухпоточный цилиндрический редуктор. Евразийский патент №017053В1, F16H 1/20 ЕАПО, Москва, 2012, Бюллетень №9, 4с. 2. *Наджафов А.М.* Поискное конструирование механического привода штанговых насосов. – Баку: изд-во аппарата ММ, 2008. – 254с. 3. *Наджафов А.М.* Теоретическая оценка влияния подшипника скольжения на кпд пакетного редуктора // Вестник машиностроения. – Москва, 2010. – №3. – С.19-21. 4. *Абдуллаев А.И., Наджафов А.М.* Качественная оценка технического уровня пакетного редуктора // Вестник машиностроения. – Москва, 2008. – №12. – С.6-9.

*Поступила в редколлегию 03.04.2013*

УДК 621.833

**О результатах промышленного испытания трехступенчатого двухпоточного пакетного редуктора станка-качалки СКД 3-1,5-710 / А.М. Наджафов, А.И. Абдуллаев // Вісник НТУ "ХП". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХП". – 2013. – №40(1013). – С.87-91. – Бібліогр.: 4 назв.**

Представлені результати промислового випробування на нафтопромислах Пираллахи триступінчатого двохпоточного пакетного редуктора верстата-качалки СКД-3-1,5-710.

**Ключові слова:** редуктор, нафтопромисли.

Here is reviewed the results of release testing of triple-reduction double-flow package gear of sucker-rod pump models SKD 3-1,5-710.

**Keywords:** gearbox, oil fields.

УДК 621.833

**С.С. ПАПИНА**, начальник отдела УП "КБТЭМ-СО" ГНПО "Планар", Минск, Беларусь;

**В.Л. БАСИНЮК**, д.т.н., доц., директор НТЦ ОИМ НАН Беларуси, Минск;

**Е.И. МАРДОСЕВИЧ**, к.т.н., заведующий сектором ОИМ НАН Беларуси;

**М.П. ЛОБКОВА**, научный сотрудник ОИМ НАН Беларуси

## **ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ МАТЕРИАЛОВ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ МОТОР-РЕДУКТОРОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

Рассматриваются вопросы организации и проведения экспресс-анализа контактной выносливости композиционных материалов зубчатых передач мотор-редукторов экстремальной техники в лабораторных имитационных условиях.

**Ключевые слова:** контактная выносливость, зубчатая передача, экспресс-анализ.

**Актуальность задачи.** Появление новых, в том числе наноструктурированных, композиционных материалов и качественно иных методов бездефор-

© С.С. Папіна, В.Л. Басинюк, Е.І. Мардосевіч, М.П. Лобкова, 2013

мационного, например лазерного или ионного, поверхностного упрочнения рабочих поверхностей зубчатых колес существенно расширило возможности создания сверхлегких мотор-редукторов с удельной мощностью 0,6-1Вт/г и более для мехатронных координатных систем. При этом, как правило, в них используются программно-управляемые двигатели, имеющие угловые скорости вращения 900-2500рад/с, и зубчатые передачи планетарного типа.

Значительное повышение угловых скоростей вращения входных валов редукторов обусловили существенное возрастание требований к контактной выносливости материалов. Вместе с тем, определение этой важнейшей характеристики материалов до настоящего времени можно отнести к наиболее трудоемкому, длительному и дорогостоящему процессу. Это взаимосвязано с необходимостью наработки в процессе испытаний значительного числа циклов нагружения, в ряде случаев превышающих 120млн. Испытания становятся еще более сложными и трудоемкими в экстремальных условиях, сочетающих вакуум с пониженными до  $-120^{\circ}\text{C}$  и (или) повышенными до  $180^{\circ}\text{C}$  температурами. В свою очередь отсутствие данных о контактной выносливости современных композиционных и поверхностно упрочненных материалов можно отнести к одному из основных факторов, сдерживающих их широкое применение в технике для экстремальных условий.

**Анализ последних исследований и литературы.** Широко практикуемые в прошлом методы исследований контактной выносливости материалов на образцах, позволяющие получить необходимую для расчетов на контактную выносливость справочную информацию, в настоящее время во многом уступили место натурным испытаниям зубчатых колес в составе узлов и трансмиссий. Это позволяет значительно ускорить процесс создания новых объектов техники, но существенно сужает возможности получения достоверной информации о прочностных свойствах материалов. При этом сохраняются тенденции развития способов определения контактной выносливости материалов в основном в направлении сокращения длительности и трудоемкости испытаний [1-6].

**Цель исследований.** Целью исследований является расширение возможностей проведения ускоренных испытаний на контактную выносливость в экстремальных условиях.

**Постановка задачи.** Основной задачей исследований являлась разработка новых методов и программно-управляемых средств ускоренных испытаний, позволяющих в сочетании с рациональным планированием эксперимента и использованием современных средств неразрушающего контроля существенно сократить трудоемкость, длительность и себестоимость их проведения при одновременном повышении информативности полученных результатов.

**Материалы исследований.** Для решения поставленной задачи был разработан способ испытаний на контактную выносливость в вакууме или агрессивной среде композиционных и поверхностно упрочненных материалов и настольное компьютеризированное устройство для его реализации. К их основным особенностям можно отнести:

- одновременное испытание нескольких, разбитых на две группы, образцов (по меньшей мере, шести), имеющих в каждой группе отличные от другой контактные напряжения, обеспечиваемые путем использования тел качения с различными радиусами;
- использование для создания линейных перемещений программно-

управляемого магнитоэлектрического двигателя (коил-двигателя) с бесконтактным размещением цилиндрического якоря внутри статора, позволяющего исключить необходимость применения в нем каких-либо смазочных материалов в экстремальных условиях проведения испытаний;

- использование для постоянного контроля процесса возникновения внутренних подповерхностных трещин неразрушающих методов контроля, например лазерного фотоакустического сканирования, позволяющих на ранней стадии обнаружить возникновение трещин и зафиксировать процесс их последующего развития.

При испытаниях на контактную выносливость амплитуда поступательно-возвратных колебаний испытываемого образца подбирается таким образом, чтобы минимизировать ее величину и на основе этого сократить длительность испытаний при одновременном обеспечении достоверности полученных результатов

$$a_S = k_a \cdot \frac{\sigma_{k_{\max}} \cdot r_{\max}}{E^*}, \quad (1)$$

где  $a_S$  – значение амплитуды поступательно-возвратных колебаний испытываемого образца;  $k_a$  – безразмерный коэффициент, равный  $k_a=36\div39$ ;  $\sigma_{k_{\max}}$  – максимальное значение контактного напряжения при прижатии упруго-деформирующего тела качения к взаимодействующей с ним испытываемой плоской поверхности образца, МПа;  $r_{\max}$  – радиус упруго-деформирующего тела качения с максимальным диаметром, мм;  $E^*$  – приведенный модуль упругости материалов испытываемой плоской поверхности образца и взаимодействующего с ним упруго-деформирующего тела качения, МПа.

**Результаты исследований.** Схема устройства для проведения испытаний نشانена на рисунке.

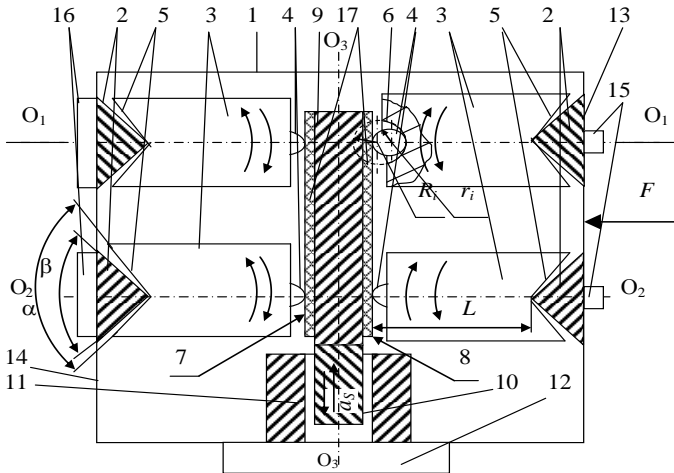


Рисунок – Схема устройства для проведения испытаний материалов на контактную выносливость материалов в вакууме или агрессивной среде

Устройство состоит из вакуумной камеры 1, в которой на противоположных стенках установлены призматические опоры 2 треугольного сечения, на каждой из них соосно (оси  $O_1$  и  $O_2$ ) размещены попарно элементы 3, например

призматической формы, с упруго-деформирующими телами качения 4, имеющие радиусы  $r$ . В торцах каждого элемента 3 выполнены углубления 5 и 6, причем углубление 5 со стороны призматической опоры 2 выполнено треугольным сечением с углом  $\alpha$  при вершине, в 1,1-1,4 раза большим, чем угол  $\beta$  вершины треугольного сечения соответствующей призматической опоры. Углубление 6 со стороны упруго-деформирующего тела качения 4 выполнено радиусным с радиусом  $R_6$ , в 1,1-1,4 раза большим, чем радиус  $r$  тела качения 4.

Призматические опоры 2 с элементами 3 и упруго-деформирующими телами качения 4 установлены попарно (см. рисунок) с двух сторон с возможностью взаимодействия с испытываемыми плоскими поверхностями 7 и 8 образца 9 в двух параллельно расположенных плоскостях симметрично соответственно осям " $O_1-O_1$ " и " $O_2-O_2$ ", перпендикулярным испытываемым плоским поверхностям 7 и 8 образца 9. Это обеспечивает возможность удерживания образца 9 упруго-деформирующими телами качения 4 с противоположных сторон при его статическом положении и при поступательно возвратном перемещении вдоль оси " $O_3-O_3$ " в процессе испытаний.

По существу упруго-деформирующие элементы 4 в рассматриваемом случае образуют опоры качения, позволяющие исключить необходимость их дополнительного создания в устройстве, связанные с дополнительными опорами качения потери, и на основе этого обеспечить уточненное определение коэффициентов трения качения.

В вакуумной камере установлен программно-управляемый линейный движитель, выполненный, например, в виде коил-двигателя (*Linear Voice Coil Motor*) с ротором 10, с которым жестко связывается испытываемый образец 9, и статор (катушка) 11.

Для обеспечения поступательно-возвратных программно-управляемых перемещений устройство снабжено электронным модулем 12, размещенным с наружной стороны вакуумной камеры 1 и связанным со статором 11 через герметичный разъем.

Электронный модуль 12 обеспечивает поступательно-возвратные перемещения статора 11 и жестко связанного с ним образца 9 с заданной амплитудой  $a_{s1}$  или  $a_{s2}$  в направлении оси " $O_3-O_3$ ", перпендикулярном осям симметрии " $O_1-O_1$ " и " $O_2-O_2$ " попарно расположенных призматических опор 2 и элементов 3 с упруго-деформирующими телами качения 4.

Ротор 10 размещен в статоре 11 с зазором, стабильная величина которого в плоскости (не показана), перпендикулярной перемещениям ротора 10, обеспечивается упруго-деформирующими телами качения 4, удерживающими испытываемый образец 9 в заданном положении не препятствуя его перемещению вдоль оси ротора 10.

Одна из стенок 13 вакуумной камеры 1, на которой установлены призматические опоры 2 треугольного сечения, снабжена упруго-деформируемой мембраной. С внешней стороны этой мембраны с помощью программно-управляемого устройства и пьезоактюатора создается усилие  $F$ , упруго деформирующее стенку 13 и направленное вдоль осей " $O_1-O_1$ " и " $O_2-O_2$ " перпендикулярно плоским поверхностям 7 и 8 испытываемого образца 9. За счет силы  $F$  и ответной реакции противоположной жесткой стенки 14 вакуумной камеры 1 обеспечивается усилие притяжения упруго-деформирующих тел качения 4 к испытываемым поверхностям 7 и 8.

Соосно с попарно расположенными призматическими опорами 2 и элементами 3 с упруго-деформирующими телами качения 4 на осях " $O_1-O_1$ " и

"O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>" установлены источники 15 и приемники 16 сканирующего сигнала, обеспечивающего неразрушающий контроль, например, лазерным фотоакустическим методом [7, 8], процесса появления и развития подповерхностных усталостных трещин на поверхностях 7 и 8 испытываемого образца 9.

Упруго-деформирующие тела качения 4 могут быть выполнены сферическими, в виде роликов или бочкообразными из стали, например ШХ15, упрочненной до твердости HRC 58-65. Из аналогичной стали и с аналогичным упрочнением до твердости HRC 58-65 изготавливаются призматические опоры 2 и элементы 3.

Призматические опоры 2, выполнение в виде правильной треугольной призмы, подобраны и установлены таким образом, чтобы обеспечить сочетание наиболее равномерного распределения контактных давлений:

- между двумя упруго-деформирующими телами качения сферической формы, размещенными на одном элементе 3;

- по длине контактной линии упруго-деформирующих тел качения 4 цилиндрической формы (в виде ролика) и ответной ему плоской поверхностью 7 или 8;

- вдоль линии контакта установленных с возможностью взаимодействия поверхностей призматической опоры 2 и элемента 3.

В совокупности приведенные выше конструктивные решения позволяют надежно удерживать испытываемый образец 9 с противоположных сторон в положении, при котором его испытываемые плоские поверхности 7 и 8 образца 9 перпендикулярны направлению действия на них упруго-деформирующих тел качения 4 и образец 9 имеет возможность совершать поступательно-возвратные перемещения с ротором 10 коил-двигателя в направлении оси "O<sub>3</sub>-O<sub>3</sub>".

Радиусы попарно размещенных упруго-деформирующих тел качения 4 могут быть различны для создания при испытаниях различных контактных давлений.

Ширина "В" полосы сканирующего сигнала, создаваемого источником 15 и принимаемого приемником 16, и его расположение обеспечивается таким образом, чтобы она была больше расстояния "b" между крайними точками пятен контакта при взаимодействии упруго-деформирующих тел качения 4 с испытываемыми плоскостями 7 и 8.

**Выводы.** Анализ результатов исследований показал, что при реализации предлагаемого технического решения эффективное снижение трудоемкости проведения испытаний в вакууме и обеспечение возможности контроля процесса контактного разрушения поверхностно упрочненных материалов и материалов с относительно небольшими по толщине упрочняющими покрытиями, у которых контактные усталостные трещины возникают и развиваются под поверхностью, что обуславливает значительную длительность испытаний, может быть достигнуто в результате следующего:

- в процессе проведения испытаний на контактную усталостную прочность плоских поверхностей с упрочняющими покрытиями в условиях вакуума осуществляется постоянный контроль процесса появления и развития подповерхностных трещин, позволяющий существенно повысить информативность процесса проведения испытаний и на определенных стадиях циклического нагружения прогнозировать ресурс;

- в процессе одного цикла проведения испытаний длина дорожки качения локализована и уменьшена до пятна контакта, т.е. длительность одного цикла испытаний и их длительность до контактного разрушения сокращена на порядок и более;

– за счет подбора радиусов тел качения при общей внешней силе нагружения  $F$  и одинаковых величинах сил  $F_i$  в одном цикле испытаний могут быть созданы различные уровни контактных нагружений различных пар "упруго-деформирующее тело качения – ответная плоская поверхность испытываемого образца", что позволяет за один цикл испытаний построить кривую контактной усталости.

**Список литературы:** 1. Патент CN №1841041, МПК G01N 3/56, опубл. 04.10.2006 г. 2. Патент РФ №2357227, МПК G01N 3/56, опубл. 27.05.2009г. 3. Патент РФ №2357228, МПК G01N 3/56, опубл. 27.05.2009г. 4. Патент РФ №2357230, МПК G01N3/56, опубл. 27.05.2009г. 5. Патент №WO2004083826, МПК G01N3/56, опубл. 30.09.2004г. 6. Патент РФ №83845, МПК G01N 3/56, опубл. 20.06.2009г. 7. *Латин В.Л., Рубцевич И., Керенцев А.* Повышение надежности микроконтактных соединений радиационно-стойких мощных транзисторов // Силовая электроника. – 2011. – №11 – С.100-105. 8. *Латин В.Л., Валкентштейн С., Клюева С.* Контроль качества герметизации пластмассовых корпусов интегральных схем // Технологии в электронной промышленности: электронные и ионные технологии. – 2009. – №8. – С.61-64.

*Поступила в редакцию 08.04.2013*

УДК 621.833

**Программно-управляемые средства для экспресс-анализа контактной выносливости материалов зубчатых передач мотор-редукторов мехатронных систем экстремальной техники / С.С. Папина, В.Л. Басинюк, Е.И. Мардосевич, М.П. Лобкова // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2013. – №40(1013). – С.91-96. – Бібліогр.: 8 назв.**

Розглядаються питання організації і проведення експрес-аналізу контактної витривалості композиційних матеріалів зубчатих передач мотора-редукторів екстремальної техніки в лабораторних імітаційних умовах.

**Ключові слова:** контактна витривалість, зубчаста передача, експрес-аналіз.

The problems of organization and performing the rapid analysis of contact endurance of composite materials of extreme equipment motor-reducer gears in laboratory imitating conditions are considered.

**Keywords:** contact endurance, gearing, rapid analysis.

УДК 621.833.6

**Ф.И. ПЛЕХАНОВ**, д.т.н., проф., директор Глазовского инженерно-экономического института (филиала) ФГБОУ ВПО "Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова", Россия;  
**А.В. ОВСЯННИКОВ**, аспирант ФГБОУ ВПО "Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова"

## **НАГРУЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ И КПД ПЛАНЕТАРНОЙ ПЕРЕДАЧИ С РОЛИКОВЫМ МЕХАНИЗМОМ СНЯТИЯ ДВИЖЕНИЯ С САТЕЛЛИТА**

Приведен метод определения нагрузочной способности оригинальной конструкции планетарной передачи, основанный на решении уравнений совместности перемещений зубьев колес и уравнения деформированного состояния ролика. Представлены результаты экспериментального исследования КПД передачи.

**Ключевые слова:** планетарная передача, нагрузочная способность, прочность, КПД.

**Актуальность задачи.** Зубчатые планетарные передачи, содержащие эксцентриковое водило и механизм снятия движения с сателлита, при малой разнице чисел зубьев колес обладают высокой нагрузочной способностью, меньшими габаритами и массой, большим передаточным отношением в одной ступени. Однако использование в них механизма параллельных криво-

© Ф.И. Плеханов, О.В. Овсянников, 2013