

колес методами химико-термической обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 303с.
6. Механика разрушения и прочность металлов: Справочное пособие: В 4 т. / Под общ. ред. В.В. Панасюка. – Киев: Наук. думка, 1988. – Т.1: Основы механики разрушения / В.В. Панасюк, А.А. Андрейков, В.З. Партон. – 1988. – 488с. 7. *Kalachev V.A.* Водородная хрупкость металлов. – М.: Metallurgija, 1985. – 217с. 8. Водород в металлах / Под ред. Г.Альфельда и И.Фелькля. – М.: Мир, 1981. – Т.2 – 430с. 9. *Karpenko G.V.* Влияние водорода на свойства стали / Г.В. Карпенко, Р.И. Крипакевич. – М.: Металлургиздат, 1962. – 198с. 10. *Kaplun V.G., Pastuh I.M.* Энерго и ресурсозберігаюча екологічна чиста технологія та обладнання для зміцнення деталей машин // Машинознавство. – №2. – 2002. – С.49-51. 11. *Kaplun P.V.* Дослідження напружено-деформованого стану пластини з покриттями при контактному навантаженні // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах – 1999. – №4. – С.179-182. 12. *Kaplun P.V.* Кинетика износа сталеі с дифузионними покриттями при контактном циклическом нагружении // Проблеми трибології. – Хмельницький, 2001. – №1. – С.199-124.

Bibliography (transliterated): 1. *Aleksandrov V.I., Sobolev A.S.* Materialy zubchatykh kolez gruzovykh avtomobilej. – Minsk: ANBSSR Institut problem nadezhnosti i dolgovechnosti mashin, 1978. – 58p. 2. *Dymshic I.I.* Korobki peredach. – Moscow: Mashgiz, 1960. – 360p. 3. *Trubin G.K.* Kontaktnaja ustalost' materialov dlja zubchatykh kolez. – Moscow: Mashgiz, 1962. – 404p. 4. *Kopf I.A., Kornilov V.V., Efimov E.V.* Nestacionarnaja termicheskaia model' zaedaniia i iznosa jevol'ventnykh zubchatykh peredach // Tehnika mashinostroeniia. – 1998. – No1(15). – P.54-59. 5. *Zinchenko V.M.* Inzheneriia poverhnosti zubchatykh kolez metodami himiko-termicheskoj obrabotki. – Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2001. – 303p. 6. *Mehanika razrusheniia i prochnost' metallov: Spravochnoe posobie: V 4 vol. / Pod obshh. red. V. V. Panasyuka.* – Kiev: Nauk. dumka, 1988. – Т.1: Osnovy mehaniki razrusheniia / V.V. Panasyuk, A.A. Andrejkov, V.Z. Par-ton. – 1988. – 488p. 7. *Kalachev V.A.* Vodorodnaja hrupkost' metallov. – Moscow: Metallurgija, 1985. – 217p. 8. *Vodorod v metallah / Pod red. G. Al'fel'da i I. Fel'klja.* – Moscow: Mir, 1981. – Vol.2. – 430p. 9. *Karpenko G.V.* Vlijanie vodoroda na svojstva stali / G.V. Karpenko, R.I. Kripjakevich – Moscow: Metallurgizdat, 1962. – 198p. 10. *Kaplun V.G., Pastuh I.M.* Energo i resursozberigajucha ekologichna chista tehnologija ta obladnannja dlja zmicnennja detaliej mashin // Mashinoznavstvo. – No2. – 2002. – P.49-51. 11. *Kaplun P.V.* Doslidzhennja napru-zheno-deformovanogo stanu plastini z pokrittjami pri kontaktnomu navantazheni // Vimirjuval'na ta obchislju-val'na tehnika v tehnologichnih procesah – 1999 – No4. – P.179-182. 12. *Kaplun P.V.* Kinetika iznosa stalej s diffuzionnymi pokryttjami pri kontaktnom ciklicheskom nagruzenii // Zhurnal "Problemi tribologii". – Hmel'nic'kij, 2001. – No1. – P.199-124.

Поступила (received) 29.04.2015

УДК 621.833.22

А.В. КУЗНЕЦОВА, к.т.н., доцент каф. ПМиКП ДонНТУ, Красноармейск;
А.Н. ГНИТЬКО, к.т.н., доц., заведующий каф. ГМиМСМ ДонНТУ;
В.П. ОНИЩЕНКО, д.т.н., профессор каф. ПМиКП ДонНТУ

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАЦЕПЛЕНИЯ КОНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ С ДВОЯКОВЫПУКЛО-ВОГНУТЫМИ ЗУБЬЯМИ НА ИХ РЕСУРС

В статье проведена оценка влияния параметров зацепления конических передач с двояковыпукло-вогнутыми зубьями на их ресурс. Разработана методика прогнозирования ресурса конических зубчатых передач с двояковыпукло-вогнутыми зубьями путем выбора рациональных параметров зацепления на основании моделирования изнашивания зубьев. Методика основывается на двух математических моделях: модели зацепления зубьев и имитационной численной модели изнашивания зубьев.

Ключевые слова: двояковыпукло-вогнутые зубья, износ, ресурс, коническая передача, модуль, число зубьев, контактные напряжения.

Введение. Актуальность задачи. В современных серийных конструкциях приводов горных и транспортных машин используются конические передачи с двояковыпукло-вогнутыми (ДВВ) зубьями, которые имеют ресурс в

пределах одного-двух межремонтных сроков, то есть выходят из строя через 8...16 месяцев эксплуатации. По статистическим данным в среднем за год в Украине происходит свыше 250тыс. отказов приводов, вследствие чего простой технологического оборудования составляют более 1 млн. часов, а соответствующие ремонтные затраты – свыше 7,5 млрд. гривен.

Одним из перспективных путей повышения ресурса конических передач с ДВВ зубьями является выбор рациональных параметров зацепления (коэффициентов смещения, модуля, количества зубьев шестерни и колеса и ширины зубчатого венца) на стадии проектирования передачи на основании моделирования изнашивания рабочих поверхностей зубьев. Поскольку указанные факторы существенно влияют на ресурс конических передач с ДВВ зубьями, то соответствующие научные исследования являются актуальными, а задача повышения ресурса конических передач с ДВВ зубьями выбором рациональных параметров зацепления на основании моделирования изнашивания рабочих поверхностей зубьев имеет практическую ценность.

Анализ последних исследований и литературы. Проблемой износа зубьев зубчатых передач занимались многие исследователи. На основе анализа большого количества изношенных зубчатых колес приводов горных машин Молдавским Л.А. [1] установлен факт тесной взаимосвязи между различными видами поврежденных зубьев. На основе анализа этого статистического материала было доказано, что искажение профиля зуба в результате износа приводит к уменьшению приведенных радиусов кривизны, повышению контактных напряжений и, как следствие, к ускоренному развитию выкрашивания, а также появлению заедания рабочих поверхностей и др. Мыга Дж.Р. [2] экспериментально доказал, что искажение профилей закаленных зубьев в результате их износа существенно влияет на динамические нагрузки в зацеплении. А. Вилк, Дж.Н. Куанг и А.Д. Лин [3] ввели в динамическую модель профили изношенных колес, используя упрощенную модель профилей изношенных зубьев и считая передаточное отношение постоянным. Ю. Войнаровский и Онищенко В.П. [4] провели аналитические и экспериментальные исследования влияния деформации и износа зубьев на динамику зубчатых колес. Результаты экспериментов показали, что изменение профиля зубьев во время износа следует учитывать при расчетах на долговечность зубчатых передач.

Целью статьи является оценка влияния параметров зацепления конических передач с двояковыпукло-вогнутыми зубьями на их ресурс на основании моделирования изнашивания рабочих поверхностей зубьев.

Постановка задачи. Для оценки влияния параметров зацепления конических передач с ДВВ зубьями на их ресурс был разработан комплекс математических моделей. Комплекс включает в себя математическое описание теоретического профиля и профиля изношенного зуба, модель зацепления изношенных зубьев и модель износа зубьев в контактной точке. По введенной исходной форме профилей зубьев модель позволяет установить форму профилей зубьев по истечению заданного периода времени, оценить степень изменения передаточного числа, контактных напряжений, скорости скольжения и других параметров качества передачи. Путем варьирования входными параметрами можно спроектировать зубчатую передачу с наиболее рациональными показателями.

Общая блок-схема модели прогнозирования формы профилей зубьев

© А.В. Кузнецова, А.Н. Гнитько, В.П. Онищенко, 2015

представлена на рисунке 1.

Блок ввода исходных данных содержит исходные данные для прогнозирования ресурса. В качестве управляемых параметров используются коэффициенты смещения исходного контура x_1, x_2 для шестерни и колеса; m_{nm} – нормальный модуль в среднем сечении зуба; z_1, z_2 – количество зубьев соответственно шестерни и колеса; ширина зубчатого венца b . Также исходным параметром является максимальный по условиям эксплуатации ресурс L_h передачи с ДВВ зубьями (определяемых варьированием коэффициентов смещения исходного контура x_1, x_2 , модуля m_{nm} , количества зубьев z_1, z_2 и ширины зубчатого венца b).

В блоке модели зацепления зубьев выполняется математическое описание профиля боковых поверхностей ДВВ зубьев шестерни и колеса, формируется матрица координат точек профиля боковой поверхности зубьев шестерни и колеса, выполняется построение аппроксимирующей кривой рабочей поверхности зубьев. Определяются координаты контактной точки, мгновенное передаточное число, скорости перемещения контактной точки по профилям зубьев, а также скорость скольжения, нормальная сила и контактные напряжения.

Блок износа зуба в контактной точке определяет значение износа контактирующих поверхностей с учетом максимально возможного числа факторов. Производится распределение износа между зубьями шестерни и колеса. Далее выполняется сравнение полученных значений износа в контактных точках профиля и критического значения износа, которое принимается равным 80% толщины цементационного слоя зубьев шестерни и колеса.

Блок синтеза изношенного профиля по величине износа в отдельных точках профиля формирует новый профиль, сглаживая профильные кривые только в зонах износа и сохраняя в зонах отсутствия контакта прежние координаты не затронутой износом части профиля. Далее повторно (в цикле) используются блок модели зацепления зубьев и блок модели износа зубьев. Если износ зубьев, после n -ого цикла, становится большим, либо равным значению критического износа, то зубья колес считаются изношенными и работа программы прекращается.

Блок расчета ресурса переводит условные циклы изнашивания в ресурсе передачи.

Для автоматизации расчетов согласно приведенной методике разработано и реализовано соответствующее программное обеспечение в среде Mathcad.

С помощью разработанной программы выполнен анализ влияния коэффициентов смещения, модуля и количества зубьев шестерни и колеса, ширины зубчатого колеса на ресурс L_h .

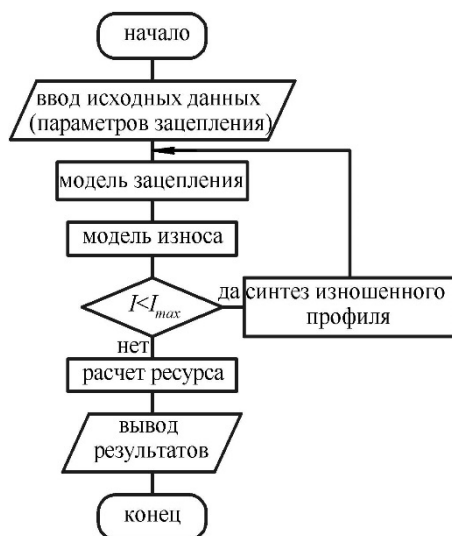


Рисунок 1 – Блок-схема прогнозирования ресурса конических передач с ДВВ зубьями

Из анализа графиков (рисунок 2) следует:

- изменение ресурса в зависимости от модуля имеет нелинейный характер; с увеличением модуля ДВВ зубьев в 1,8 раза значение ресурса возрастает в 1,2 раза при прочих равных условиях;
- изменение ресурса в зависимости от количества зубьев шестерни имеет характер близкий к линейному; с увеличением z_1 в 3 раза значение L_h возрастает в 2 раза при прочих равных условиях;
- изменение ресурса в зависимости от количества зубьев колеса имеет нелинейный характер; с увеличением z_2 в 3,6 раза значение L_h возрастает в 1,4 раза при прочих равных условиях;
- изменение ресурса в зависимости от ширины зубчатого венца имеет нелинейный характер; с увеличением b в 2,33 раза значение L_h возрастает в 1,16 раза при прочих равных условиях.

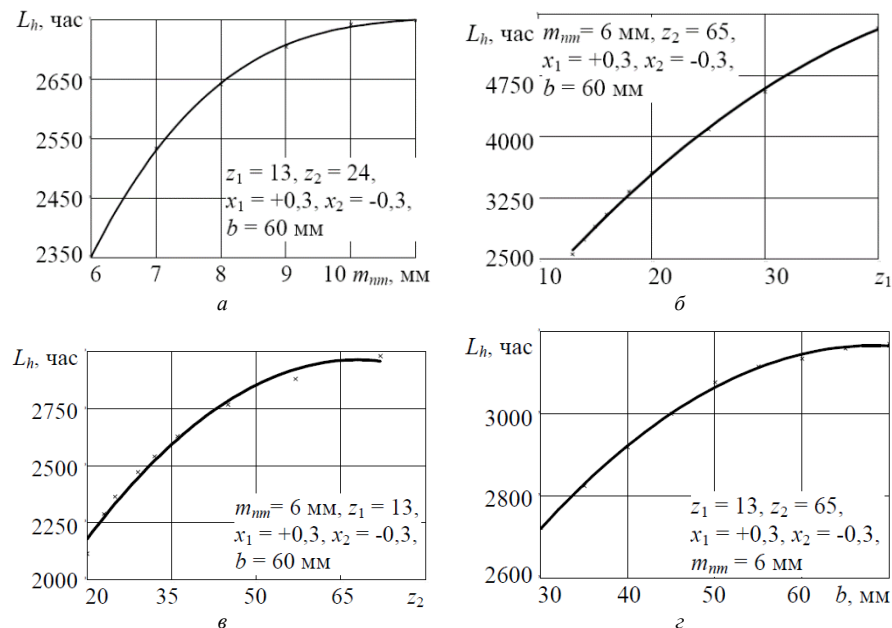


Рисунок 2 – График зависимости ресурса L_h конической передачи с ДВВ зубьями: а – от модуля m_{nm} ; б – от количества зубьев шестерни z_1 ; в – от количества зубьев колеса z_2 ; г – от ширины зубчатого венца b

Результаты расчета при помощи разработанной программы показали, что варьирование коэффициентов смещения шестерни x_1 и колеса x_2 при высотной коррекции незначительно влияет на изменение значений ресурса L_h ДВВ зубьев конической передачи. Так, при изменении x_1 и x_2 от 0 до $\pm 0,45$ (x_1 выбиралось положительным, x_2 – отрицательным, а их значения равны по модулю) значение ресурса изменилось от 2300 часов до 2351 часов (при прочих равных условиях – $z_1=13, z_2=24, m_{nm}=6$ мм, $b=60$ мм). При варьировании коэффициентов смещения шестерни x_1 и колеса x_2 в рамках угловой коррекции значение ресурса увеличилось на 9,94% от 2717 часов до 2987 часов (при $z_1=13, z_2=24, m_{nm}=13$ мм, $b=70$ мм).

Для определения максимальной по условиям эксплуатации долговечности L_h передачи с ДВВ зубьями необходимо оптимизировать значения коэффициентов смещения исходного контура x_1, x_2 , модуля m_{nm} , количества зубьев шестерни z_1 и колеса z_2 , ширины зубчатого венца.

Выводы. На основе анализа влияния параметров зацепления конических передач с ДВВ зубьями на их ресурс с помощью разработанной программы установлено:

- варьирование коэффициентов смещения шестерни и колеса (высотная коррекция) в рамках рекомендуемых стандартом геометрических параметров конических передач с ДВВ зубьями практически не влияет на изменение значений ресурса зубчатой пары (параметры исследуемой передачи – $z_1=13, z_2=24, m_{nm}=6\text{мм}, b=60\text{мм}$);

- угловая коррекция (увеличение суммарного коэффициента смещения) конических передач с ДВВ зубьями в рамках блокирующих контуров увеличивает значение ресурса примерно на 10 % в сравнении с зацеплением, выполненным без смещения исходного контура (параметры исследуемой передачи – $z_1=13, z_2=24, m_{nm}=13\text{мм}, b=70\text{мм}$);

- с увеличением модуля в 1,8 раза значение ресурса возрастает на 12 % в рамках рекомендуемых стандартом геометрических параметров конических передач с ДВВ зубьями (параметры исследуемой передачи – $z_1=13, z_2=24, x_1=+0,3, x_2=-0,3, b=60\text{мм}$);

- увеличение количества зубьев шестерни и колеса ДВВ зубьев конических передач приводит к возрастанию ресурса зубчатой пары в 2 раза в рамках рекомендуемых стандартом геометрических параметров конических передач с ДВВ зубьями. Причем увеличение количества зубьев шестерни вызывает примерно в 1,55 раза больший рост ресурса, чем увеличение количества зубьев колеса (параметры исследуемой передачи – $z_1=13, z_2=65, x_1=+0,3, x_2=-0,3, m_{nm}=6\text{мм}, b=60\text{мм}$);

- с увеличением ширины в 2,3 раза значение ресурса возрастает на 16 % в рамках рекомендуемых стандартом геометрических параметров конических передач с ДВВ зубьями (параметры исследуемой передачи – $z_1=13, z_2=65, x_1=+0,3, x_2=-0,3, m_{nm}=6\text{мм}$).

Список литературы: 1. Молдавский Л.А. Виды повреждений и долговечность трансмиссий горных машин / Л.А. Молдавский, З.Л. Финкельштейн, Б.А. Верклов. – М.: Изд-во "Недра", 1981. – 190с. 2. Myga J.R. Wpływ zużycia zęba na wielkość sił dynamicznych: praca doktorska / Myga J.R. – Politechnika Śląska, Gliwice, 1976. – 355s. 3. Kuang J.H. The effect of tooth wear on the vibration spectrum of a spur gear pair / J.H. Kuang, A.D. Lin // Journal of Sound and Vibration. – Transaction of ASME, Vol. 123, 2001. – pp.311-317. 4. Wojnarowski J. Tooth wear effects on spur gear dynamics / J. Wojnarowski, V. Onishchenko // Mechanism and Machine Theory. – Vol.38, 2003, pp.161-178.

Bibliography (transliterated): 1. Moldavskij L.A. Vidy povrezhdenij i dolgovechnost' transmissij gornyh mashin / L.A. Moldavskij, Z.L. Finkel'shtejn, B.A. Verklov. – Moscow: Izd-vo "Nedra", 1981. – 190p. 2. Myga J.R. Wpływ zużycia zęba na wielkość sił dynamicznych: praca doktorska / Myga J.R. – Politechnika Śląska, Gliwice, 1976. – 355p. 3. Kuang J.H. The effect of tooth wear on the vibration spectrum of a spur gear pair / J.H. Kuang, A.D. Lin // Journal of Sound and Vibration. – Transaction of ASME, Vol.123, 2001. – Pp.311-317. 4. Wojnarowski J. Tooth wear effects on spur gear dynamics / J. Wojnarowski, V. Onishchenko // Mechanism and Machine Theory. – Vol. 38, 2003, pp. 161-178.

Поступила (received) 18.05.2015