

DOI: 10.18721/ JEST.230118

УДК 531.01, 621

М.Г. Акопян, С.С. Резников, В.Н. Федотова

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗНАШИВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ И НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Статья посвящена сравнению результатов математического моделирования процесса взаимодействия зубчатых колес с результатами натурных испытаний. Произведен анализ публикаций в области экспериментального исследования процесса изнашивания зубчатых колес и передач для определения наиболее подходящих условий сравнения. Изучены методы математического моделирования зубчатых колес и передач. Выделен наиболее подходящий для сравнения с натурными испытаниями метод моделирования. Описаны особенности проведенного сравнения результатов математического моделирования и натурных испытаний. Приведены эпюры износа, полученные в результате расчета и эксперимента. Произведено сравнение результатов эксперимента и математического моделирования на разных этапах износа зубчатых колес, а также дана характеристика математической модели. Проверена методика экспериментально-расчетного исследования процесса изнашивания или проектирования износостойких зубчатых колес и передач.

ЗУБЧАТОЕ КОЛЕСО; ИСПЫТАНИЯ, ИЗНАШИВАНИЕ; ЭПЮРА ИЗНОСА; ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ; ЗУБЧАТАЯ ПЕРЕДАЧА; МОДЕЛИРОВАНИЕ; ЭКСПЕРИМЕНТ.

Ссылка при цитировании:

М.Г. Акопян, С.С. Резников, В.Н. Федотова. Сопоставление результатов изнашивания зубчатых колес при моделировании и натурных испытаниях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. 184–189. DOI: 10.18721/ JEST.230118

M.G. Akopyan, S.S. Reznikov, V.N. Fedotova

COMPARISON OF THE RESULTS OF SIMULATED GEAR WEAR WITH IN SITU TESTS

The article dedicated to comparing the results of mathematical modeling of the interaction between toothed wheels with the results of tests. The analysis of the literature in the field of experimental study of wear in gears and transmissions to highlight the most appropriate conditions for the comparison. We have studied the methods of mathematical modeling of gears and transmissions. We have identified the most appropriate mathematical model for comparison with in situ tests. We have revealed the peculiarities in comparing the results of mathematical modeling and tests. Wear diagrams obtained by calculation and experiment are presented. We have performed a comparison of the experimental results, and mathematical modeling at different stages of wear of the gears and described the mathematical model. We have verified the method of experimental and computational studies of the process of wear and designing wear-resistant gears and transmissions. The aim of this study was to evaluate the reliability of the results of mathematical modeling of gear wear process, which takes into account the evolutionary nature of the interaction process, by comparison with the result of in situ tests.

GEARWHEEL; TESTING; WEAR; DIAGRAM OF WEAR; EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL STUDY; GEAR; SIMULATION; EXPERIMENT.

Citation:

M.G. Akopyan, S.S. Reznikov, V.N. Fedotova, Comparison of the results of simulated gear wear with in situ tests, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (1) (2017) 184–189, DOI: 10.18721/ JEST.230118

Введение

Одна из основных причин выхода из строя деталей машин — износ. Наиболее подвержены износу трущиеся детали, к которым относятся зубчатые колеса. Для улучшения показателей долговечности зубчатых колес используются различные методы, а значит, проводится большое число испытаний, требующих много времени и материальных затрат.

Снижение трудоемкости испытаний возможно за счет использования математического моделирования вместо натуральных испытаний. Существуют различные методы математического моделирования зубчатых колес и процесса их взаимодействия [1]. Наибольший интерес представляют методы моделирования, учитывающие эволюционный характер процесса взаимодействия; они могут обладать высокой точностью и применяться вместо натуральных испытаний.

Цель работы — оценить путем сравнения с данными натуральных испытаний достоверность результатов математического моделирования процесса изнашивания зубчатых колес, которое учитывает эволюционный характер процесса взаимодействия.

Условия проведения сравнения

Проверка пригодности математической модели, описанной в [2], для постановки математических экспериментов по изучению процесса изнашивания зубчатых передач осуществлялась двумя способами:

сравнением результатов моделирования с результатами экспериментального исследования ряда конкретных зубчатых передач;

сопоставлением закономерностей поведения математической модели с общими закономерностями процесса изнашивания, известными из экспериментов и практики эксплуатации машин и механизмов.

Многочисленные работы посвящены экспериментальному исследованию процесса изнашивания зубчатых передач [2–7]. Однако отсутствие единообразия в условиях проведения экспериментов и различие в методах обработки результатов приводит во многих случаях к потере ценной информации и существенно снижает эффективность экспериментальных исследований. Анализ литературных источников показал, что наиболее подходящими для оценки точности математической модели процесса изнашивания являются результаты экспериментов Х. Плева [3, 4, 5] и Г. Адама [3, 6].

Параметры передач и условия проведения экспериментов приведены в таблице 1.

Малая частота вращения шестерни в процессе проведения эксперимента во многом предопределила выбор этих результатов для оценки точности разработанной модели. Именно при таких условиях реальная передача наиболее полно описывается выбранной упругостатической моделью, не учитывающей динамические нагрузки, возникающие в зацеплении. Кроме того, при малых скоростях не проявляются гидродинамические свойства смазки.

Таблица 1

Параметры передач и условия проведения экспериментов

Авторство данных	Модуль m , мм	Число зубьев шестерни z_1	Число зубьев колеса z_2	Межосевое расстояние a_w , мм	Коэффициент смещения исходного контура для шестерни x_1	Коэффициент смещения исходного контура для колеса x_2	Рабочая ширина передачи b_w , мм	Момент на валу колеса M_2 , Н·мм	Частота вращения шестерни n_1 , об/мин
Х. Плева	4,5	16	24	91,5	0,180	0,173	18,5	$3,6 \cdot 10^5$	13
Г. Адам	10	15	23	198,5	0,500	0,475	15	$1,1 \cdot 10^6$	230

Это позволило предположить, что в передачах реализуется такое изнашивание, когда его интенсивность для зубьев шестерни и колеса может быть определена из уравнений

$$I_1 = K_1 p v_1; \quad I_2 = K_2 p v_2, \quad (1)$$

где $K_1 = K$ и $K_2 = \frac{1}{u} K$.

В математическом эксперименте при моделировании изнашивания значение коэффициента K , который, по сути дела, является масштабом времени (или наработки), неизвестно. Поэтому первоначально принималось $K = 1$. Процесс изнашивания продолжался до тех пор, пока максимальный износ зуба шестерни не достиг величины, полученной в ходе реального эксперимента (46 мкм). После чего было проведено сравнение экспериментальных и расчетных эпюр износа (рис. 1). Если предположить, что выброс на экспериментальной эпюре (рис. 1, а) является проявлением местного, случайного изменения условий изнашивания (например, локальное отклонение износостойкости материала), то можно считать, что графики, приведенные на рисунке, демонстрируют хорошее совпадение результатов эксперимента и математического моделирования.

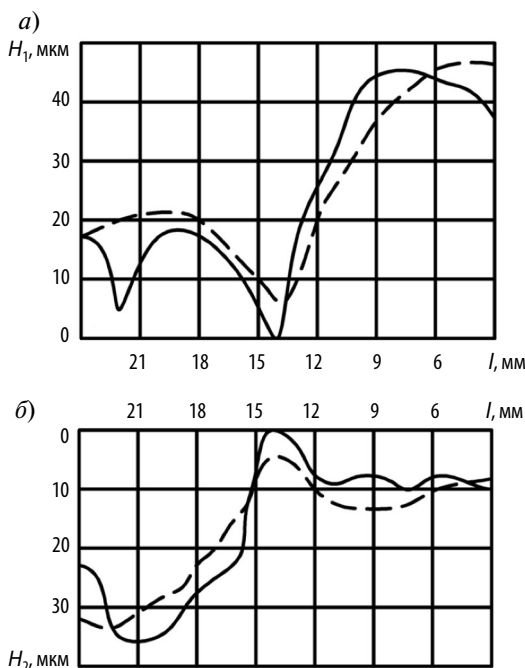


Рис. 1. Эпюры износа

— эксперимент; — — — расчет)

H_1 — величина износа шестерни; H_2 — величина износа колеса

Результаты эксперимента

Сравнение результатов реального и математического экспериментов позволило определить действительное значение коэффициента K . Если значения наработки n и n' , приведшие к одинаковым износам в реальном и математическом экспериментах, то

$$K = \frac{n'}{n}. \quad (2)$$

Для рассматриваемой передачи $K = 8,29 \times 10^{-5}$ мкм/(Н·об). Знание действительного значения K позволяет проводить математическое моделирование дальнейшего изнашивания передачи уже в реальном масштабе времени.

Указанный подход был реализован при моделировании передачи $z_1 = 15, z_2 = 23$ (эксперимент Адама). Результаты ее экспериментального исследования приведены в виде ряда эпюр износа зуба колеса для ряда последовательных наработок.

Погрешность профилей в исходной передаче составляла 4–6 мкм для шестерни и 35–59 мкм для колеса. Материалы имели значительное различие в твердости: HRC 56–58 — для шестерни и HB 1640–1690 Н/мм² для колеса. Поэтому при максимальном износе зубьев колеса 780 мкм максимальный износ зубьев шестерни не превышал 40 мкм.

Моделирование изнашивания производилось в 2 этапа. На первом этапе при $K = 1$ определялось значение коэффициента Q (Q — отношение износостойкости материалов колес), обеспечивающее требуемое соотношение максимальных износов зубьев шестерни и колеса. После чего по формуле (2) определялось действительное значение коэффициента K . Получено: $Q = 50, K = 6,31 \cdot 10^{-6}$ мкм/Н·об. На втором этапе проводилось моделирование изнашивания в реальном масштабе времени. Интенсивность изнашивания определялась по формулам

$$I_1 = 6,31 \cdot 10^{-6} p v_1; \quad I_2 = 2,10 \cdot 10^{-4} p v_2.$$

Эпюры износа, полученные в результате расчета и эксперимента, приведены на рис. 2. Они достаточно близки для различных этапов изнашивания передачи. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных позволяет сделать вывод, что математическая модель учитывает



основные связи и явления, существенные для процесса изнашивания зубчатого зацепления, и может быть использована для изучения его закономерностей.

Следует отметить, что в ходе экспериментальной проверки модели проверена и методика экспериментально-расчетного изучения или проектирования процесса изнашивания износостойких зубчатых передач. Она заключается в том, что на первом этапе одновременно проведены реальный и математический эксперименты с одной из передач интересующего нас класса. После этого произведено уточнение вида формул, используемых для вычисления интенсивности изнашивания действительного значения масштабного коэффициента K . Дальнейшее изучение процесса изнашивания передач данного класса или выбор из них наиболее износостойкой передачи производится только на основании математической модели.

Выводы

Трудоемкость экспериментальных исследований приводит к тому, что результаты испытаний весьма ограниченного числа передач очень часто переносят на целый класс этих механизмов. Такой подход не учитывает сложную взаимосвязь между конструктивными параметрами

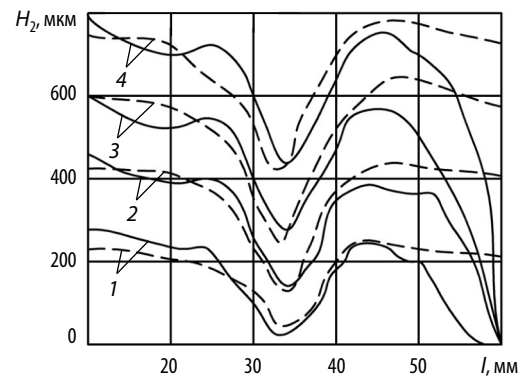


Рис. 2. Эпюры износа при разных скоростях вращения колеса (— эксперимент; - - - расчет): 1 — $4 \cdot 10^5$, 2 — $5 \cdot 10^5$, 3 — $6 \cdot 10^5$, 4 — $7 \cdot 10^5$ об. кол.

зацепления и его поведением при изнашивании, которую наглядно демонстрирует математическая модель.

Между тем полученные результаты показывают пригодность исследованной математической модели для использования при проектировании и исследовании зубчатых колес. Благодаря этому можно значительно ускорить проектирование новых зубчатых колес и сократить расходы на постановку их в производство, особенно если речь идет о мелкосерийном или единичном производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников С.С., Акопян М.Г., Петров А.И. Анализ методов математического моделирования для исследования и изготовления зубчатых колес // Интернет-журнал Науковедение. 2016. Т. 8. № 1(32). С. 51.
2. Айрапетов Э.Л. Состояние и перспективы развития методов расчета нагруженности и прочности передач зацеплением. Методические материалы. Ижевск-Москва: изд-во ИжГТУ, 2000. 118 с.
3. Баранов А.В., Вагнер В.А., Тарасевич С.В., Баранова Ю.А., Пономарева А.Н. Проблема оценки износа сопряжений зубчатых колес транспортных машин и энергетического оборудования // Ползуновский вестник. 2010. № 1. С. 99–105.
4. Онищенко В.П., Голдобин В.А. Прогнозирование работоспособности зубчатых передач с учетом взаимовлияния формы изношенных зубьев и характеристик контакта // Вісник Східноукраїнського університету імені Володимира Даля. 2007. №9 (115). С. 165–171.
5. Онищенко В.П. Прогнозирование формы профилей зубьев зубчатых передач в результате их износа // Прогрессивные технологии и системы машиностроения, Международный сб. научных трудов / Донецк, ДонГТУ, 1998. Вып. 5. С. 155–163.
6. Bakhnovich A.G. Analysis of the stressed state of teeth of drive toothed belts of standard structures // Механика машин, механизмов и материалов. 2010. № 1 (10). С. 21–28.
7. Варсимашвили Р.Ш., Кахиани М.Р., Варсимашвили З.Р. Новые зубчатые передачи с переменным передаточным отношением // Прогресивні технології і системи машинобудування. 2013. № 1 45 (45). С. 77–84.
8. Резников С.С. Основы построения эволюционной модели процесса изнашивания зубчатого зацепления // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (2). С. 296–298.
9. Michaelis K., Brinck P. Berechnung der verschleißbedingten Flankenformänderung langsam laufender Zahnrad. Teil 2. // Antriebstechnik. 1983. Bd. 22, Nr. 12. S. 47–48.
10. Winter H., Plewe H. Abriebverschleiß und Lebensdauerberechnung an geschmierten, langsam laufenden Zahnradern. Teil 1. // Antriebstechnik. 1982. Bd. 21, № 5. S. 231–237.

11. Winter H., Plewe H. Abriebverschleis und Lebensdauerberechnung an geschmierten, langsam laufenden Zahnradern. Teil 2. // *Antriebstechnik*. 1982. Bd. 21, № 6. S. 282–286.

12. Adam G. Verschlei berechnung an Geradstirnrädern aus Stahl bei Kleinen Zaynumfangegechwindikeiten. // *Schmierungstechnik*. 1979. Bd.10, № 7. S. 206–209.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АКОПЯН Мисак Геворкович — аспирант Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. 197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49. E-mail: brain-net@mail.ru

РЕЗНИКОВ Станислав Сергеевич — кандидат технических наук доцент, Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. 197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49. E-mail: reznikov@mail.ifmo.ru

ФЕДОТОВА Виктория Николаевна — магистр Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. 197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49. E-mail: vika-1306@yandex.ru

REFERENCES

1. Reznikov S.S., Akopyan M.G., Petrov A.I. Analiz metodov matematicheskogo modelirovaniya dlya issledovaniya i izgotovleniya zubchatykh koles [Analysis of methods of mathematical modeling for the research and manufacture of gears]. *Internet-zhurnal Naukovedeniye*. 2016. T. 8. № 1(32). S. 51 (rus.)

2. Ayrapetov E.L. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya metodov rascheta nagruzhennosti i prochnosti peredach zatsepleniym: Metodicheskiye materialy. Izhevsk-Moskva: Izd-vo IzhGTU, 2000. 118 s. (rus.)

3. Baranov A.V., Vagner V.A., Tarasevich S.V., Baranova Yu.A., Ponomareva A.N. Problema otsenki iznosa sopryazheniy zubchatykh koles transportnykh mashin i energeticheskogo oborudovaniya. *Polzunovskiy vestnik*. № 1. 2010. S. 99–105. (rus.)

4. Onishchenko V.P., Goldobin V.A. Prognozirovaniye rabotosposobnosti zubchatykh peredach s uchetom vzaimovliyaniya formy iznoshennykh zubyev i kharakteristik kontakta // *Visnik Skhidnoukraïnskogo universitetu imeni Volodimira Dalya*. 2007. №9 (115). S. 165–171.

5. Onishchenko V.P. Prognozirovaniye formy profiley zubyev zubchatykh peredach v rezultate ikh iznosa. *Progressivnyye tekhnologii i sistemy mashinostroyeniya, Mezh-dunarodnyy sb. nauchnykh trudov*. Donetsk, DonGTU. 1998. Vyp. 5. C. 155–163.

6. Bakhanovich A.G. Analysis of the stressed state of teeth of drive toothed belts of standard structures. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2010. № 1 (10). S. 21–28.

7. Varsimashvili R.Sh., Kakhiani M.R., Varsimashvili Z.R. Novyye zubchatyye peredachi s peremennym pereda-tochnym otnosheniym [New gear transmissions with variable gear ratio]. *Progressivni tekhnologii i sistemi mashinobuduvannya*. 2013. № 145 (45). S. 77–84. (rus.)

8. Reznikov S.S. Osnovy postroyeniya evolyutsionnoy modeli protsessa iznashivaniya zubchatogo zatsepleniya [The fundamentals for constructing an evolutionary model of wear process of tooththing]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2011. № 4 (2). S. 296–298. (rus.)

9. Michaelis K., Brinck P. Berechnung der verschlei bedingten Flankenformänderung langsam laufender Zahnreder. Teil 2. *Antriebstechnik*. 1983. Bd. 22, № 12. S. 47–48.

10. Winter H., Plewe H. Abriebverschleis und Lebensdauerberechnung an geschmierten, langsam laufenden Zahnradern. Teil 1. *Antriebstechnik*. 1982. Bd. 21, № 5. S. 231–237.

11. Winter H., Plewe H. Abriebverschleis und Lebensdauerberechnung an geschmierten, langsam laufenden Zahnradern. Teil 2. *Antriebstechnik*. 1982. Bd. 21, № 6. S. 282–286.

12. Adam G. Verschlei berechnung an Geradstirnrädern aus Stahl bei Kleinen Zaynumfangegechwindikeiten. *Schmierungstechnik*. 1979. Bd.10, № 7. S.206–209.

AUTHORS

АКОПЯН Мисак А. — *St.Peterburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics*. Kronverkskiy pr., 49, St.Peterburg, Russia, 197101. E-mail: brain-net@mail.ru

РЕЗНИКОВ Stanislav R. — *St.Peterburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics*. Kronverkskiy pr., 49, St.Peterburg, Russia, 197101. E-mail: reznikov@mail.ifmo.ru



FEDOTOVA Viktoria N. — *St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics*. Kronverkskiy pr., 49, St. Petersburg, Russia, 197101. E-mail: vika-1306@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 12.02.2016.