

На рис. 7 представлено главное окно программы, с помощью которого вводится информация о геометрии области и производится доступ ко всем остальным функциям программы.

С помощью кнопок  и  можно соответственно считывать и записывать в файлы информацию о геометрии области (или областей). Используя кнопку  можно ввести данные о геометрии новой области — полигона, замыкание которого по кнопке  программа осуществит сама.

Кнопка  вызывает форму для задания граничных условий и изменения свойств объектов (областей), см. рис. 6. Можно изменить следующие свойства областей: модуль Юнга и коэффициент Пуассона, а также является ли область пустой (дырка) или заполненной. Граничные условия можно задавать в точках или на гранях области — вначале выбирается область, а затем и сами точки или грани. Выбранное окно ввода подсвечивается (на рис. 6 активным является окно для редактирования свойств объектов (областей)). Предусмотрен контроль правильности задания граничных условий, их непротиворечивости и полноты.

Кнопка  запускает процесс триангуляции области (областей).

По кнопке  производится перенумерация элементов, составление матрицы жесткости и определение узловых перемещений [2]. По кнопке  производится расчет деформаций и напряжений.

Приведенная программа может использоваться в курсах МКЭ в качестве лабораторного практикума, а также при инженерных или исследовательских расчетах, когда использование стандартных пакетов по каким-либо причинам невозможно.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Jim Ruppert: A Delaunay Refinement Algorithm for Quality 2-Dimensional Mesh Generation, NASA Ames Research Center, Submission to Journal of Algorithms, 1994.
2. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М.: Мир, 1977.—349 с.

О НОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И ТОЧНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Игнатищев Р.М.

In the pitch point zone of involute gearing the reductioning curvature is appreciably increasing by operation. The contact stress is appreciably increasing also. This may be taken into account: by designing, making, operation.

Сущность новизны

Из всех зубчатых передач на долю эвольвентных приходится более 75%, 90% которых работают в режиме хорошей смазки. Об этом классе передач и ведется, прежде всего, речь. Основная первопричина выхода их из строя — прогрессирующий *питтинг* (в околополосных зонах зацеплений); синонимы — явление выкрашивания, оспообразования.

Причиной появления питтинга являются недопустимо большие контактные напряжения. Для их вычисления принято использовать формулу Герца:

— если считают, что первоначальные трещины образуются с поверхности и развиваются вглубь, в качестве расчетной применяют формулу

$$\sigma = 0,418 \cdot \sqrt{q \cdot E \cdot k} \leq [\sigma], \quad (1)$$

где q — нагрузка на единицу длины контактной линии; E — приведенный модуль упругости материалов сопряженных зубчатых колес — постоянная величина;

k — соответствующая полюсу зацепления приведенная кривизна взаимодействующих поверхностей зубьев (аппроксимируемых в местах соприкосновения цилиндрами),

$$k = k_1 + k_2,$$

индекс «1» соответствует шестерне, «2» — колесу.

Если полагают, что трещины возникают под поверхностным слоем по причине чрезмерно больших касательных напряжений, то -

$\tau = 0,127 \cdot \sqrt{q \cdot E \cdot k} \leq [\tau]$ — в предположении распределения нагрузки по ширине контакта

по закону эллипса;

либо — $\tau = 0,145 \cdot \sqrt{q \cdot E \cdot k} \leq [\tau]$ — в предположении распределения нагрузки по ширине контакта по параболе.

Результаты расчета не зависят от того, какая из приведенных 3-х формул применяется — по той причине, что разными принимают допускаемые напряжения (пропорциональные стоящим перед

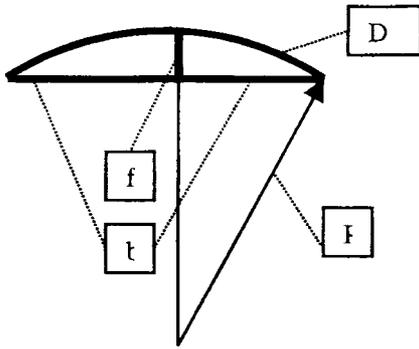
корнями числовым коэффициентам). По этой причине, говоря о формуле Герца, в дальнейшем будем иметь ввиду наиболее распространенную зависимость (1).

Некорректность ныне действующих подходов заключается в том, что k считают постоянной во времени величиной. На самом же деле:

— малые, едва заметные на глаз, износы поверхностей зубьев приводят к существенному увеличению их кривизны в околополосных зонах — в 2-3 и более раз. Обусловлено это неравномерными по длине профилей износами: минимальный — в точках перехода головок в ножки; максимальный — примерно посередине ножек.

Об указанной некорректности уже сообщалось — 3 десятка лет назад, с подробными доказательствами — см. [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7] и др.

К сожалению, рассматриваемая научная находка осталась незамеченной специалистами (о чем свидетельствуют публикации последних лет — см. [8], [9], [10], другие). Это и побудило автора вернуться к вопросу.



Основной причиной незамеченности существенного научного результата является неверие специалистов в то, что такое может быть. Это вынуждает автора начать пояснения с приведения элементарного математического анализа. На рисунке изображены: D — дуга окружности радиуса R ; b — длина стягивающей ее хорды; f — стрелка. По теореме Пифагора:

$$(R-f)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 = R^2 \quad \mapsto \quad \left(R - \frac{f}{2}\right) = \frac{b^2}{8 \cdot f} \quad \mapsto$$

$$R \equiv \frac{b^2}{8 \cdot f} \quad (2)$$

Чтобы специалист поверил в существование изменения радиусов кривизны профилей зубьев у нормально эксплуатируемых передач достаточно, на наш взгляд, точечно-численной иллюстрации, основанной на зависимости (2). Приводим ее.

В некорректированной передаче с модулем зацепления $m = 10$ мм радиус кривизны эвольвентного профиля в зоне полюса для зубчатого колеса с числом зубьев $z = 40$ — $R_p = 61,8$ мм. Это зна-

чит, что для аппроксимирующей дуги окружности при хорде $b = 0,3 \cdot m = 3$ мм ее стрелка $f_p = 0,018$ мм.

Если в процессе эксплуатации передачи профиль зуба в околополосной зоне изменился так, что стрелка f возросла всего на $0,05$ мм (максимальный износ, при этом, на ножке будет находиться в диапазоне $0,1-0,3$ мм, что, по оценкам обслуживающего персонала, для передачи $m = 10$ мм составляет мизерную величину — «зубья только приработались»), то радиус кривизны на рассматриваемом участке составит:

$$R = \frac{3^2}{8 \cdot (0,018 + 0,05)} = 16,5 \text{ мм},$$

что в 3,7 (!) раза меньше доэксплуатационного его значения.

О возможности повышения долговечности зубчатых передач на ремонтных заводах

Иллюстрируем это примером из практики. — В середине 60-х годов ушедшего столетия в комбинате «Луганскуголь» (46 шахт) было установлено: после капитального ремонта угольные комбайны «Кировец» не отработывают свой межремонтный цикл (вместо 7,5 месяцев отказы наступают через 2-4 месяца); главная причина — поломка зубчатой пары «К-4-0002» — «К-4-0053» («К-4-0002» и «К-4-0053» — это условные обозначения завода-изготовителя — Горловский машзавод; сталь 18ХГТ, цементация на глубину 1,5 мм с последующей закалкой; $z_1 = 11$, $z_2 = 29$, $m = 9$ мм).

Обследования (на Кадиевском рудоремонтном заводе) радиусов кривизны в околополосных зонах подвергшихся питтингу зубьев на колесах «К-4-0053» специально созданным радиусомером [6] позволили установить: математическое ожидание критических значений (при которых имел место прогрессирующий питтинг) радиусов кривизны в околополосной зоне — 20,5 мм, что в 2,7 раза было меньшим доэксплуатационного его значения (56 мм); критическое значение радиуса кривизны распределялось по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением — $S = 3,2$ мм. Было принято решение: те зубчатые колеса пар «К-4-0002» — «К-4-0053», которые выглядели как только что приработавшиеся, но у которых в околополосных зонах колес «К-4-0053» радиусы кривизны оказывались менее 30 мм (15 — 20 — 25 — 30), ставить на зубошлифовальный станок и шлифовать поверхности зубьев на глубину 0,2-0,4 мм (глубина отсчитывалась от точек профилей, соответствующих полюсу зацепления). Решение оказалось правильным — главная причина преждевременного отказа выпшедших из капремонта комбайнов «Кировец» была ликвидирована.

Об эксплуатационном методе повышения долговечности

Часто встречаются передачи, допускающие доступ к зубьям (смотровые крышки, возможность

снятия верхних частей корпусов и т.д.) во время планово-предупредительных ремонтов. Проблем с замером радиусов кривизны рабочих поверхностей зубьев модулем 5 и более миллиметров нет; сегодня для этой цели наиболее приемлем, на наш взгляд, метод слепков с боковых поверхностей зубьев с последующим использованием математической зависимости (2). Это и позволяет непосредственно эксплуатационникам (службам механиков) повышать долговечности зубчатых передач в 2 и более раз. При этом, чаще всего будут иметь место случаи, когда статистические данные по питтингу конкретно интересующей пары отсутствуют (не накоплены). Для них можно пользоваться правилом:

— если радиусы кривизны поверхностей зубьев колеса, замеренные в зоне полюса на базе 0,3 модуля, уменьшились в два раза, по сравнению с первоначальным значением, то службам механиков, с целью упреждения появления прогрессирующего питтинга, целесообразно планировать их восстановление в течение месяца.

Если задача по разборке редуктора с последующей установкой зубчатых колес на зубошлифовальный станок реально неразрешима, то для крупномодульных зубчатых пар (10-20 и более мм) корректировку профилей зубьев можно осуществлять ручным инструментом — через смотровые крышки быстро-вращающимися (от пневмо- или электроприводов) абразивными кругами.

О возможности повышения долговечности зубчатых передач путем использования внеполюсных и околоэвольвентных зацеплений

У профилей зубьев внеполюсных зацеплений нет точек, в которых скорость относительного скольжения изменяет направление на 180°. Это снимает явление существенного повышения приведенных кривизн и обеспечивает (при правильном расчете) любую длительность эксплуатации передачи без появления в ней питтинга.

Негатив: увеличение потерь на трение. Но это увеличение не кратное (поскольку потери в зацеплении — это лишь одна из трех составляющих общих потерь в передаче) и если энергоэкономическая составляющая требований, предъявляемых к устройству, малозначима, то можно идти на использование внеполюсных зацеплений.

Можно долговечности зубчатых передач повышать и методом замены околополюсных частей эвольвент зубьев шестерни плавно сопряженными, внутренне расположенными, отрезками линий. И динамика от этого не возрастет; дело в том, что факторы «эксплуатационно нормальные износы», «смазочные прослойки», «изгибные» и «контактные деформации зубьев» являются более существенно влияющими факторами.

К вопросу о повышении точности проектирования зубчатых передач

Целесообразность корректировки ныне действующих методик расчета зубчатых передач на

контактную прочность лучше всего, на наш взгляд, обосновать напоминанием всеобщего известного исторического примера-аналога — напоминанием о той большой полезности, которую получило общество переходя от ошибочного Геоцентрического к правильному Гелиоцентрическому представлению строения Мира (от общепринятого в течение полутора тысяч лет руководства по астрономии Птолемея под названием «Альмагест» к «О вращении небесных сфер» Коперника).

При разработке новых методик расчета зубчатых передач на предупреждение питтинга целесообразно:

1. Учитывать действительные значения приведенных кривизн (которые в околополюсных зонах являются существенно возрастающими функциями времени эксплуатации передач);

2. Освободить существующие методики от наносного, появившегося как нечто компенсировавшее промахи, связанные с учетом действительных кривизн; в частности, целесообразно перейти к пределам контактной выносливости материалов, как единой количественной характеристики, пригодной для оценки контактной прочности и роликотополщеников, и лобовых вариаторов, и поверхностей зубьев зубчатых передач.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Игнатищев Р.М. Об условии контактной прочности зубчатых колес. В сб. «Вопросы технологии, механизации и экономики угольной промышленности». — М.: Недра, 1968.- Вып.2.- С.88-92.
2. Игнатищев Р.М. К вопросу о контактной прочности ... зубьев //Горная электромеханика и автоматика. — Харьков, 1969.- Вып.12.- С.53-54.
3. Игнатищев Р.М. Влияние эксплуатационно-нормальных износов на контактные напряжения. В трудах Курского политехнического института. — Курск, 1971.- Сб.1, Ч.2.- С.258-267.
4. Игнатищев Р.М. Появление питтинга в ответственных зубчатых передачах можно предсказывать и предупреждать. /Тяжелое машиностроение, 1991, №9.- М.: Машиностроение, С.38.
5. Игнатищев Р.М. О новой возможности повышения надежности высокона-груженных зубчатых передач /Известия ВУЗов, Черная металлургия, 1991, №8.- М.: Машиностроение, С.82.
6. А.с. 225479 СССР, Кл. 42в, 26/02. Радиусомер / Р.М.Игнатищев, А.Ф.Побицкий. — Опубл. 29.08.1968, Бюл. N 27.
7. Игнатищев Р.М. Исследование контактной прочности эвольвентных цилиндрических передач: Дис.... канд. техн. наук: 161 (машиноведение и детали машин).- Защищена 26.11.68; — М.: ВЗПИ, 1967.- Т.1 (текст, библиогр.), 176с.; Т.2 (ил.), 181 с.

8. Детали машин. Учебник для студентов машиностроительных специальностей /Под ред. О.А.Ряховского.- М.: МГТУ им. Баумана, 2002.- 496 с.
9. Айрапетов Э.Л. О расчетной оценке контактных разрушений на зубьях зубчатых колес //Вестник машиностроения, 1999, №8, с.3-21.

10. Руденко С.П. Сопротивление контактной усталости цементованных зубчатых колес //Вестник машиностроения, 1999, №4, с.13-15.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Ящерицын П.И., Хейфец М.Л., Кухта С.В., Пальвинский С.В.

It is offered to use the criteria describing controllable parameters of technological system at the automated designing physical and chemical methods of processing. Designing plasma-mechanical, electromagnetic and electron-beam superficial processing of constructional materials is considered.

It is shown, that transitions of technological system from one condition in another are described by criteria of carry which characterize determining parameters of the combined methods of physical and chemical processing of materials. Mechanisms of formation of physical and chemical parameters of quality of processing are determined by modes of equilibrium conditions of technological system.

Перспективным направлением является создание новых физико-химических комбинированных методов обработки, основанных на сочетании в одном процессе различных видов энергии или разных способов воздействия на обрабатываемый материал [1].

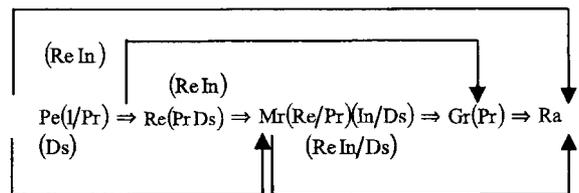
Под методом обработки понимается совокупность энергетических и информационных процессов, направленных на изменение формы, размеров, качества поверхности и физико-химических свойств конструкционного материала [2, 3].

Для формализации условий целенаправленного создания новых методов обработки каждая совокупность одноименных компонентов системы описывается как некоторое множество технологических решений (ТР) [3, 4].

При обосновании выбора ТР и синтезе комбинированных физико-химических методов необходимо учитывать стабильность формирования параметров качества обработки и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологического процесса путем применения обратных связей [5, 6]. Поскольку условия, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений и стабилизацию формирования параметров качества физико-химической обработки, являются следствием избыточности рассматриваемой технологической системы по структурному составу [7], то целесообразно в качестве целевой функции вместо конкретных зна-

чений совокупности критериев выбора использовать критерии самоорганизации процессов [8].

Критерии термомеханических процессов. Критерии переноса устанавливают последовательности структурообразования в обрабатываемом материале и на формируемой поверхности при постепенном (\Rightarrow) и резком (\rightarrow) возрастании мощности воздействий потоками энергии [5, 10]:



в которых $Pe = vt/\omega$ — критерий Пекле, определяющий отношение количества теплоты, отводимого конвекцией и путем теплопроводности; $Pr = \nu/\omega$ — критерий Прандтля, характеризующий способность теплоты распространяться в данной среде; $Re = vt/\nu$ — критерий Рейнольдса, описывающий переход движения обрабатываемого материала из ламинарного в турбулентное; $In = \beta g \nabla T t^2 / \nu^2$ — отношение подъемной силы плавучести к инерционной силе; $Ds = \lambda \nabla T t / (\nu \rho \nu)$ — отношение сил капиллярности и вязкости; $Mr = \lambda \nabla T t^2 / (\rho \omega \nu)$ — критерий Марангони, определяющий возникновение регулярных поверхностных течений вследствие