

▶ КОМПЛЕКСНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ В ПРОГРАММЕ nanoCAD МЕХАНИКА 5.4

Перед современным конструктором при проектировании часто ставятся довольно сложные задачи, при решении которых требуется учитывать большое количество нормативных документов и рекомендаций. Одной из таких задач является расчет зубчатых передач. Их частое использование в узлах и механизмах обусловлено необходимостью точной и надежной передачи вращательного движения. Таким образом, расчет зубчатых передач является одним из базовых конструкторских расчетов. В имеющихся сегодня на рынке программных продуктах для машиностроителей такие расчеты, как правило, есть, но практически везде они, особенно с точки зрения прочности, выполняются по сильно упрощенным методикам.

Основным нормативным документом для расчета зубчатых передач на прочность является ГОСТ 21354-87 "Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность", далее "Стандарт прочности"; с учетом всех его приложений этот норматив является одним из самых сложных машиностроительных стандартов. Основным нормативным документом для расчета геометрии является ГОСТ 16532-70 "Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет геометрии", далее "Стандарт геометрии", оформлять чертежи следует в соответствии с ГОСТ 2.403-75 "Правила выполнения чертежей цилиндрических зубчатых колес". Кроме того, следует учитывать также требования ГОСТ 13755-81 "Передачи

зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходный контур", ГОСТ 2185-66 "Передачи зубчатые цилиндрические. Основные параметры", ГОСТ 1643-81 "Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски" и ряда других нормативных документов и рекомендаций.

В новой версии программы nanoCAD Механика 5.4 пользователям доступен значительно усовершенствованный комплексный расчет зубчатых передач (в едином модуле учтено большое количество различных требований и рекомендаций). Более 200 управляющих элементов, учитывающих практически все нюансы Стандарта прочности и других стандартов проектирования зубчатых передач, удобно сгруппированы на нескольких вкладках расчетного модуля. Здесь же можно провести проектировоч-

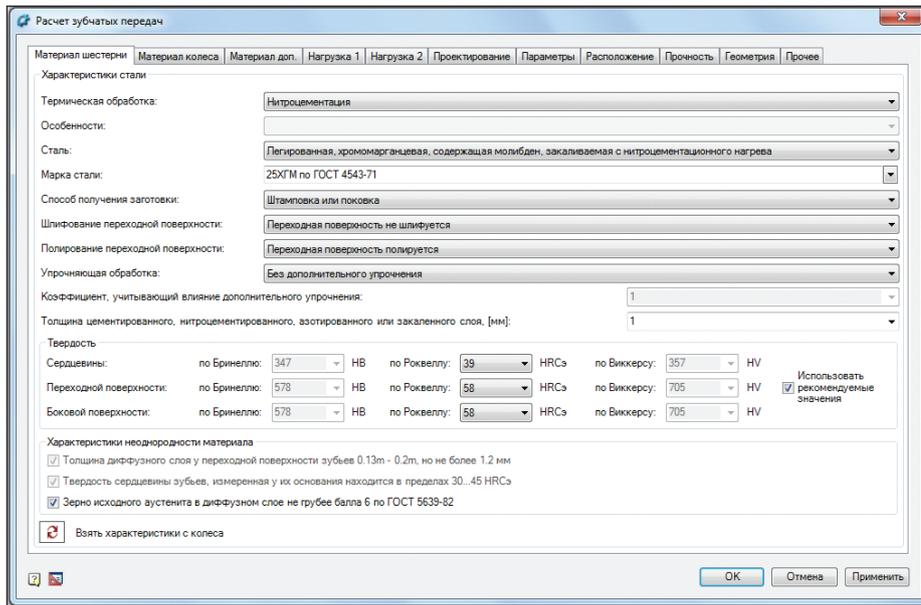


Рис. 1. Выбор характеристик материала

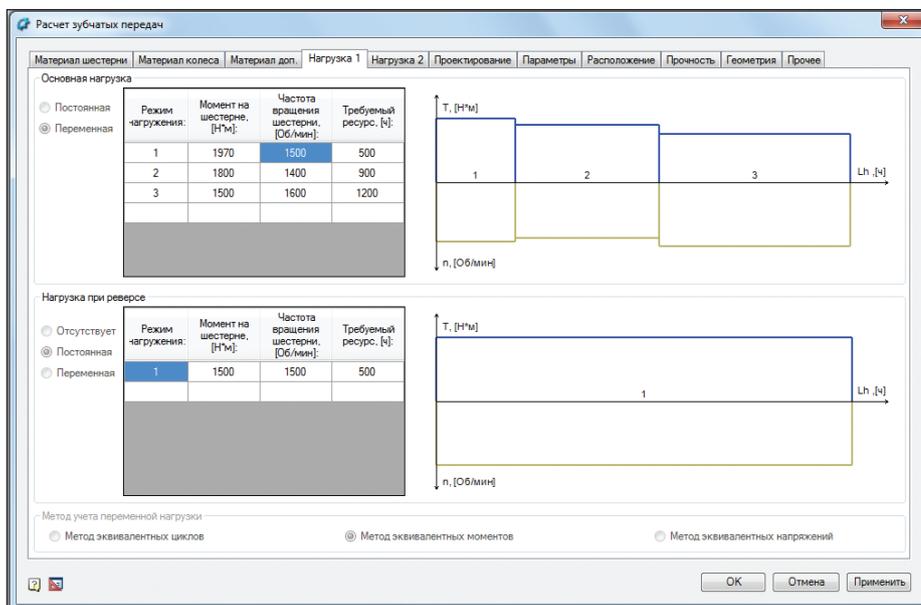


Рис. 2. Ввод параметров нагружения

ный расчет, а также расчет геометрии зубчатых передач.

На первых вкладках (рис. 1) задаются характеристики материала, при этом за основу взяты экспериментальные данные из таблиц параметров Стандарта прочности, максимально сохранена логика выбора параметров, то есть по термообработке и стали выбираются твердость, запасы прочности, пределы выносливости и т.д. Здесь же можно учесть способ получения заготовки зубчатого колеса, упрочняющую обработку, различные характеристики неоднородности материала

и другие особенности технологии изготовления, которые оказывают влияние на прочность и используются в стандартах. Также предусмотрена возможность применения в расчете пользовательских характеристик, то есть можно рассчитывать не только стальные зубчатые колеса со стандартными характеристиками, но и зубчатые колеса из практически любого материала, задавая любую твердость сердцевины и поверхностей зубьев, коэффициент Пуассона, модуль упругости, предел текучести, запасы прочности и пределы выносливости.

Можно рассчитывать передачи с очень широким спектром нагрузок, то есть, например, можно рассчитать как передачу с параметрами по умолчанию и моментом на шестерне 1 Н*м, частотой вращения шестерни 1 об/мин и ресурсом 1 час (и при этом получить огромные запасы по прочности), так и передачу с моментом 100 000 Н*м, частотой вращения шестерни 100 000 об/мин и ресурсом 100 000 часов (и тогда расчетные напряжения будут гораздо больше допустимых). Расчет производится даже при срабатывании ограничений Стандарта прочности, при этом выводится соответствующее предупреждение, и использование результатов такого расчета остается на усмотрение пользователя.

Логика задания параметров нагрузки полностью соответствует Стандарту прочности: можно вводить постоянную и переменную нагрузки, основную и реверсивную. При вводе переменной нагрузки формируется циклограмма нагружения, при этом ступени нагрузки автоматически отсортировываются по крутящему моменту, а сама циклограмма для наглядности отрисовывается рядом с учетом всех ступеней нагрузки (рис. 2).

Учет изменяющихся во времени нагрузок производится в соответствии с Приложением 3 Стандарта прочности, при этом можно выбрать любой из трех стандартных методов учета переменной нагрузки (эквивалентных циклов, эквивалентных моментов или эквивалентных напряжений).

Также можно учитывать внешние динамические нагрузки, максимальную и инерционную нагрузки. Кроме того, из большого списка можно выбрать механизм, для которого предназначена передача или, если такого механизма в списке нет, выбрать похожий на него и учесть при проектировании экспериментальные данные Приложения 4 Стандарта прочности.

В случае попадания передачи в резонансную или закритическую зону соответствующая динамическая нагрузка будет автоматически учтена согласно рекомендациям Приложения 5 Стандарта прочности.

Проектировочный расчет (рис. 3) реализован в соответствии с п. 5 Приложения 1 Стандарта прочности. В одной из формул проектировочного расчета Стандарта прочности допущена ошибка, приводящая к получению заведомо некорректных результатов, которые в дальней-

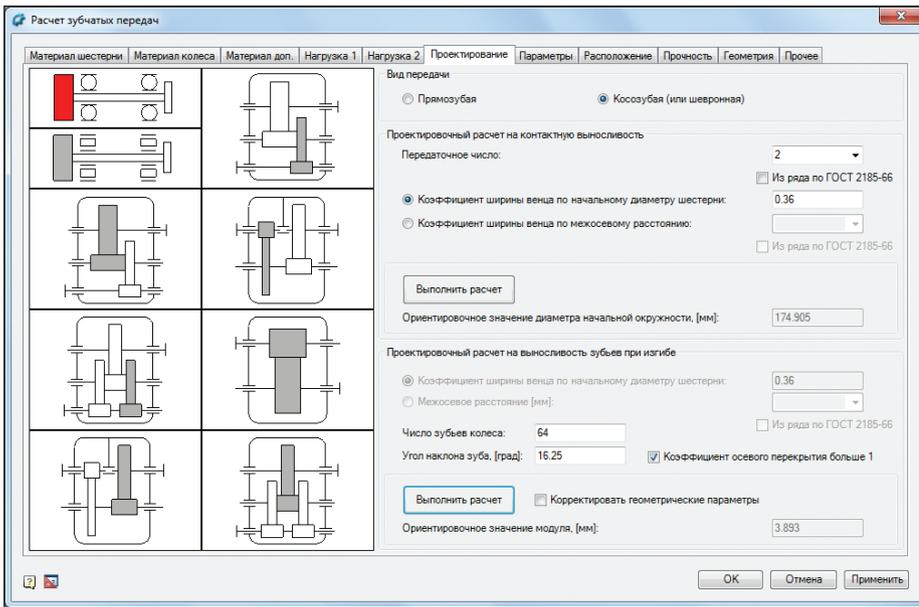


Рис. 3. Проектировочный расчет

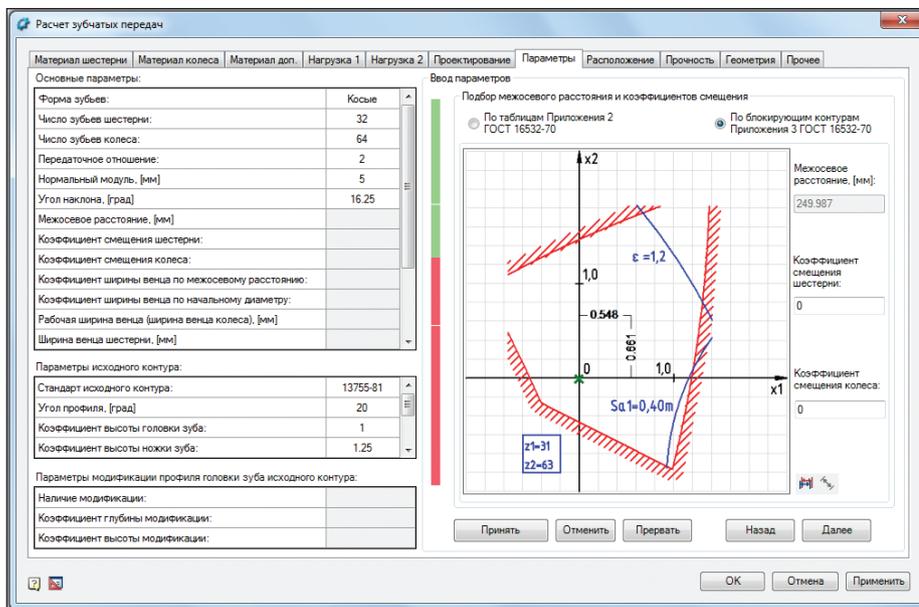


Рис. 4. Ввод параметров передачи

шем нельзя использовать. В папoCAD Механика 5.4 расчет исправлен и его результаты вполне приемлемы, но поскольку расчет приближенный, то окончательное проектирование передачи следует все-таки проводить с учетом всех параметров материала, нагрузки и геометрии зацепления. Программа позволяет последовательно задать все необходимые для расчета прочности геометрические параметры передачи, а также параметры точности и шероховатости. При вводе параметров учитываются требования соответствующих стандартов и рекомендации.

Логика стандартов реализована таким образом, чтобы их было удобно использовать. Так, например, можно оптимизировать зубчатое зацепление по таблицам Приложения 2 Стандарта геометрии, в этом случае программа автоматически разобьет суммарное смещение на составляющие. Также можно провести оптимизацию зубчатого зацепления по блокирующим контурам Приложения 3 Стандарта геометрии: в программе представлены все блокирующие контуры соответствующего стандарта. Контур выбирается автоматически по числам зубьев сопряженных колес, кро-

ме того, можно прямо на изображении блокирующего контура визуально оценить показатели качества проектируемой передачи (рис. 4).

Поскольку Стандарт прочности является базовым не только для расчетов цилиндрических, но и для конических передач, то в модуле ввода параметров создана дополнительная возможность для ввода эквивалентных чисел зубьев.

Программа позволяет учесть расположение зубчатой передачи и тип подшипников в соответствии с Приложением 6 Стандарта прочности.

В результате проверки передачи на прочность по ГОСТ 21354-87 одним нажатием кнопки производится весь комплекс прочностных расчетов. При этом расчет на контактную прочность и на прочность при изгибе производится для всех передач. Для азотированных, цементированных и нитроцементированных передач дополнительно производится расчет на глубинную контактную прочность в соответствии с Приложением 8 Стандарта прочности. А если есть максимальная нагрузка, то в этом случае дополнительно проводятся расчеты допустимых и расчетных напряжений при максимальной нагрузке. Для прямозубых передач можно провести уточненный расчет на прочность при изгибе в соответствии с Приложением 9 Стандарта прочности, а для косозубых и шевронных – уточненный расчет допускаемых контактных напряжений в соответствии с Приложением 7 Стандарта прочности.

Результаты расчета выводятся таким образом, что можно сразу же оценить пригодность передачи для указанных условий работы, и если по каким-то условиям она не проходит проверку, то параметры, на которые следует обратить особое внимание, подсвечиваются красным цветом (рис. 5).

По результатам расчета прочности можно сформировать отчет в формате RTF (рис. 6). Отчет генерируется по форме Приложения 11 Стандарта прочности. То есть для параметров в таблицах выводятся их наименования, обозначения, ссылка на метод определения в Стандарте прочности, а также приводится описание метода определения и результат – таким образом, можно проконтролировать соответствие хода расчета Стандарту прочности.

Для расчета геометрии использована логика вычислений, изложенная в Стандарте геометрии. Исходные параметры для расчета не нужно согласовывать

Новые олимпиады черчения

НОВОСТЬ

В Омске прошел 3-й (заключительный) тур второй региональной Олимпиады по электронному черчению среди студентов омских вузов, организованной студией компьютерной живописи, графики и дизайна "Панкова", НОУ ДПО "Магма" и Молодежным экспертным советом ОАО "Омскнефтехимпроект".

Для ОАО "Омскнефтехимпроект" организация второй региональной Олимпиады по электронному черчению является частью программы, направленной на развитие интереса к инженерной деятельности и реализацию творческого потенциала подрастающего поколения.

Первая Олимпиада проходила среди школьников, студентам же такая возможность представилась впервые. Свои заявки на участие отправили более тридцати претендентов, десять из которых (студенты СибАДИ и ОмГУ имени Ф.М. Достоевского) дошли до финала: Сергей Васильев, Мария Гончаренко, Елена Гурьева, Наталья Юрченко, Станислав Ржаницын, Людмила Шевелева, Анастасия Утенкова, Руслан Журавков, Владислав Минин и Максим Бабидорич.

Финалисты в течение полутора часов решали графические задачи на построение видов, целесообразного разреза и изометрической проекции детали с вырезом 1/4 части по ее описанию. Задание, которое сформировали инженеры компании – члены Молодежного экспертного совета (МЭС) ОАО "Омскнефтехимпроект" Людмила Дульнева и Сергей Капанин, требует умения видеть предмет на основе анализа его геометрического состава и конструктивных особенностей детали, знания курса инженерной графики, а также умений и навыков электронного черчения в программе паpоCAD (разработка компании "Нанософт").



Анатолий Петрович Панков, основатель студии "Панкова", автор более 150 научных работ и 17 изобретений, так оценил значение прошедшей Олимпиады:

– Вторая Олимпиада по электронному черчению среди студентов стала уникальным мероприятием в России благодаря тому что совпала с общим трендом импортозамещения – омские студенты открыли для себя программу паpоCAD. Работа ОАО "Омскнефтехимпроект", направленная на просвещение и поощрение подрастающего поколения, – большое и очень важное дело.

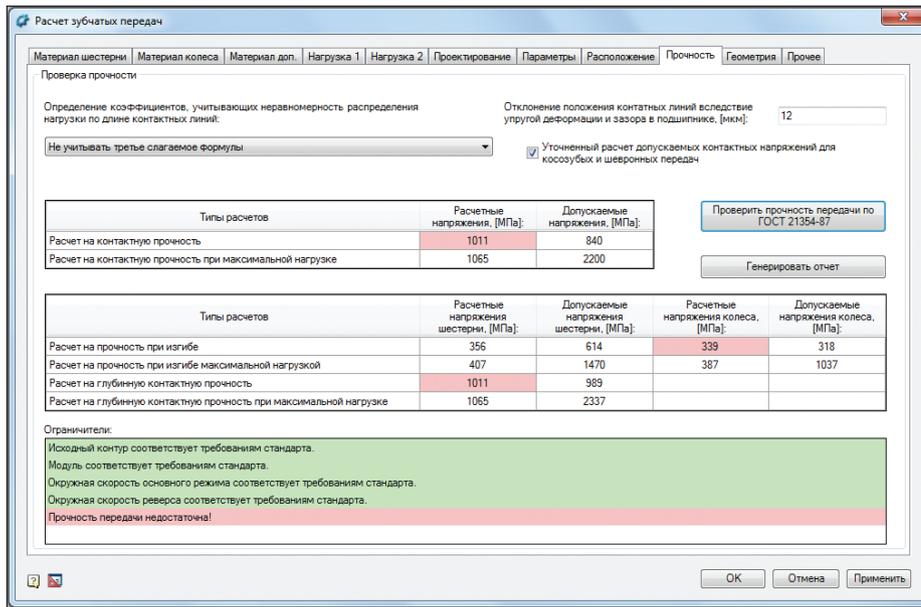


Рис. 5. Расчет на прочность

| | | | |
|--|---------------|------------------|---|
| зубьями | | | $K_{H\alpha} = \frac{\sigma_H}{\sigma_{Hlim}} \times \left(\frac{0.9 + 0.4 \times \sigma_H \times \sigma_{H\alpha}}{\sigma_{Hlim} \times K_A \times K_{H\beta} \times K_{H\gamma}} \right)$ <p>для косозубых ($\sigma_H > 2$) и шевронных:</p> $K_{H\alpha} = 0.9 + 0.4 \times \left(\frac{\sigma_H \times (\sigma_H - 1)}{\sigma_{Hlim}} \right)$ $\sigma_H \times \sigma_{H\alpha} \times \left(\frac{\sigma_H \times \sqrt{r_{p01}^2 + r_{p02}^2 - \gamma\alpha}}{F_{H\alpha} \times K_A \times K_{H\beta} \times K_{H\gamma}} \right)$ $K_{H\alpha} = 1.054$ |
| Коэффициент нагрузки | K_H | Формула (33) | $K_H = K_A \times K_{H\beta} \times K_{H\gamma} \times K_{H\alpha}$ $K_H = 1.319$ |
| Контактное напряжение при $K_H = 1$, [МПа] | σ_{H0} | Формула (32) | $\sigma_{H0} = Z_E \times Z_H \times Z_{\epsilon} \times \sqrt{\frac{F_{H0}}{b \times d_1 \times u + 1}}$ $\sigma_{H0} = 682$ |
| Расчетное контактное напряжение, [МПа] | σ_H | Формула (31) | $\sigma_H = \sigma_{H0} \times \sqrt{K_H}$ $\sigma_H = 783$ |
| Базовые числа циклов напряжений, соответствующие пределу выносливости | N_{Hlim} | Табл. 11, п. 3.1 | <p>Для шестерни: $N_{Hlim} = \min \left(\frac{30 \times H_0^{2.4}}{120 \times 10^6} \right)$</p> <p>для шестерни: $N_{Hlim} = 120 \times 10^6$</p> <p>для колеса: $N_{Hlim} = 78 \times 10^6$</p> |
| Суммарное число циклов напряжений | N_K | | <p>Для шестерни:</p> $N_{K1} = 60 \times \eta_1 \times L_1$ $N_{K1} = 90 \times 10^6$ <p>Для колеса:</p> $N_{K2} = N_{K1} \times \frac{L_2}{L_1}$ $N_{K2} = 45 \times 10^6$ |
| Коэффициент долговечности | | | <p>При $N_K \leq N_{Hlim}$:</p> <p>- для однородной структуры материала:</p> $Z_N = \min \left(\sqrt[3]{\frac{N_{Hlim}}{N_K}}, 2.6 \right)$ <p>- для поверхностного упрочнения:</p> $Z_N = \min \left(\sqrt[3]{\frac{N_{Hlim}}{N_K}}, 1.8 \right)$ <p>при $N_K > N_{Hlim}$: $Z_N = \max \left(\sqrt[3]{\frac{N_{Hlim}}{N_K}}, 0.75 \right)$</p> <p>для шестерни $Z_{N1} = 1.049$;</p> <p>для колеса $Z_{N2} = 1.095$;</p> |
| Коэффициент, учитывающий шероховатость сопряженных поверхностей зубьев | Z_R | Табл. 11, п. 4 | <p>Для $0.63 \leq Rz \leq 1.25$ $Z_R = 1$;</p> <p>для $1.25 < Rz \leq 2.5$ $Z_R = 0.95$;</p> <p>для $10 \leq Rz \leq 40$ $Z_R = 0.9$;</p> <p>$Z_R = 0.95$</p> |
| Коэффициент, учитывающий окружную скорость | Z_v | Табл. 11, п. 5 | <p>При $H \leq 350$ HV</p> $Z_v = 0.85 \times v^{0.1}$ <p>при $H > 350$ HV</p> $Z_v = 0.925 \times v^{0.05}$ <p>для шестерни $Z_{v1} = 1.052$;</p> <p>для колеса $Z_{v2} = 1.052$;</p> |
| Коэффициент, учитывающий влияние смазки | Z_L | Табл. 11, п. 6 | $Z_L = 1$ |
| Коэффициент, учитывающий размер зубчатого | Z_x | Табл. 11, п. 7 | <p>Для $d < 700$ (мм): $Z_x = 1$;</p> <p>для $d \geq 700$ (мм): $Z_x = \sqrt{1.07 - 10^{-4} \times d}$;</p> |

Рис. 6. Сгенерированный отчет по расчету прочности

с параметрами расчета прочности, следует просто дополнительно задать те параметры, которые отсутствуют в расчете на прочность. По результатам расчета геометрии можно сформировать отчет в формате RTF.

Результаты расчета можно передать в объекты паpоCAD Механика 5.4 для построения моделей зубчатых колес, автоматического получения таблиц параметров зубчатого венца и формирования технических требований.

Комплексный расчет зубчатых передач является довольно сложным нововведением в техническом функционале новой

версии программы паpоCAD Механика 5.4. Он предназначен для значительного упрощения расчетов зубчатых передач в соответствии с многочисленными нюансами Стандарта прочности. В отличие от подобных расчетов у конкурентов, этот расчет производится без использования различных упрощающих проверку прочности коэффициентов и в полном объеме учитывает широкие расчетные возможности Стандарта прочности.

Алексей Хромых, к.т.н., инженер-конструктор "Магма-Компьютер" (Омск)