Научная статья

Original article

УДК 621.83.054.3

ПРОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ КОСОЗУБОГО ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

VERIFICATION CALCULATION OF THE OBLIQUE GEAR ENGAGEMENT

Чирков Иван Сергеевич, студент четвёртого курса Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова по специальности «Прикладная механика» (190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д.1), тел. +7 905 267 82 86, rfg.gef@yandex.ru

Вересов Даниил Константинович, студент четвёртого курса Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова по специальности «Прикладная механика» (190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д.1), тел. +7 911 884 16 14, dinja12122000@gmail.com

Расчупкина Татьяна Вячеславовна, ассистент кафедры Е7 «Механика деформируемого твердого тела» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д.1), тел +7 964 396 50 73, raschupkina_tv@voenmeh.ru

Ivan S. Chirkov, fourth-year student of the Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov, specialty "Applied Mechanics" (190005, St. Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya str., 1), tel. +7 905 267 82 86, Rfg.gef@yandex.ru

Daniil K. Veresov, fourth-year student of the Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov, specialty "Applied Mechanics" (190005, St. Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya str., 1), tel. +7 911 884 16 14, dinja12122000@gmail.com

Raschupkina Tatiana Vyacheslavovna, Assistant of the Department E7 "Mechanics of deformable solids" of the Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov (190005, St. Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya str., 1), tel +7 964 396 50 73 , raschupkina_tv@voenmeh.ru

Аннотация. В работе проводится проверочный расчёт косозубого зубчатого зацепления с поверхностным упрочнением зубьев, аналитический расчет был произведён по методике ГОСТ-21354. Тип поверхностного упрочнения – цементация. Аналитический расчёт сравнивается со значениями, полученными с помощью программы ANSYS Mechanical, в котором упрочнение задается путём изменения температуры поверхностного слоя.

Annotation. In the work, a verification calculation of the oblique tooth gearing with surface hardening of the teeth is carried out; the analytical calculation was carried out according to the GOST-21354. The type of surface hardening is cementation. The analytical calculation is compared with the values obtained using the ANSYS Mechanical program, in which the hardening is set by changing the temperature of the surface layer.

Ключевые слова: проверочный расчет, зубчатая пара, поверхностное упрочнение, цементованный слой, ANSYS, оценка контактной выносливости.

Keywords: test calculation, gear pair, surface hardening, cemented layer, ANSYS, assessment of contact endurance.

Зубчатые колеса в большинстве имеют упрочнение поверхности. Поэтому в изучении колес необходимо изучать НДС зубьев этих колес, в местах предельно-допустимых значений напряжений. В данной работе будет использоваться программный комплекс ANSYS. Упрочнение зубьев представляет собой биметаллическую конструкцию с разными физико-механическими свойствами.

“Любое упрочнение поверхности обусловливает НДС за счет остаточных напряжений, которые суммируются с напряжениями от внешней нагрузки и должны учитываться при расчете. В случае использования классических методов расчета свойства упрочняемых колес задаются коэффициентами, не

учитывающими структуру и конкретные свойства упрочненного слоя и сердцевины. Исследовано значение и роль остаточных напряжений, а также их связь со структурой и свойствами цементуемой стали при определении допускаемых напряжений. Найдены касательные напряжения, по которым оценивается контактная прочность. Численные методы анализа, заложенные в программе ANSYS, дают несущественные расхождения в расчетах изгибной и контактной прочности и позволяют обходится без эмпирических коэффициентов, используя стандартные характеристики механических свойств.” - [С.И. Каратушин, Н.А. Бильдюк, Ю.А. Плешанова, П.Н. Бокучава - Проверочный силовой расчет в ANSYS зубчатого зацепления]

Для анализа расчетов выбрана зубчатая косозубая пара со следующими параметрами:

$Z_a = 20$; $Z_g = 38$; $m = 2{,}25$; $b_w = 40$; $T_a = 40$ Н * м;

Для проверочного расчета в ANSYS построена модель косозубого зубчатого зацепления в SOLIDWORKS и перенесена в программный модуль Workbench. Чтобы не перегружать память компьютера рассматривается фрагмент зацепления. Так же мы используем только фрагмент, для создания более мелких конечных элементов и достичь необходимых точностей при расчете.

Для проведения проверочного расчета косозубой зубчатой пары, в программном комплексе SOLIDWIRKS была построена 3-х мерная модель зубчатого зацепления. Для сокращения требуемых мощностей для расчета был использован только фрагмент от общей модели. Данная упрощенная модель была перенесена в программный модуль ANSYS Workbench.

В рассмотренной задаче используется глубина цементации 1.5 мм, и значение крутящего момента 40 Н*м.

Таблица 1

Результаты расчета по общепринятой методике (ГОСТ 21354)

Параметр	Значение
Делительный диаметр, мм:	
шестерни	46,587
Колеса	88,516

Диаметр окружности вершин, мм: Шестерни Колеса	 51.087 93.016
Межосевое расстояние, мм	67.5515
Передаточное число	1.9
Окружная сила, Н	1717,2
Коэффициент, учитывающий форму зуба и концентрацию напряжений: Шестерни Колеса	 4.054 3.777
Контактные напряжения в полюсе зацепления, МПа	609.7
Изгибные напряжения в опасном сечении, МПа: Шестерни Колеса	 112.4 104.7

Цементованный слой – высокопрочный материал, обладающий высокой твердостью и низкой пластичностью. Выбираем подобный материал им является сталь ШХ15, имеющая характеристики: $\sigma_{-1} = 650$МПа, $n = 10^6$, но без учета концентраторов напряжения. Предел прочности при температуре 180° колеблется в границах от 2000 - 2150МПа. Задаем диаграмму S-N Curve в программе ANSYS для материала цементации, а также предел текучести $\sigma_{0.2} = 1960$МПа.

Использование программного комплекса ANSYS позволяет учесть все изложенные выше факторы и провести расчет, соответствующий физической сущности материала и нагружения. Задача решалась в объемной постановке с использованием с использованием тетраэдальных конечных элементов с квадратичной интерполяцией поля перемещений и соответствующих конечных элементов для контакта поверхность - поверхность. Контактная задача решалась модифицированным методом Лагранжа для упругой области. Модуль упругости легированных цементуемых сталей цементованного слоя составляет 210...215 ГПа.

Для расчета верхняя шестеренка закреплялась в ступице, а к нижнему колесу прикладывался крутящий момент относительно его оси. Осевое перемещение запрещено. Для расчетов использовалось поперечное сечение колес.

Наиболее характерные картины распределения различных напряжений для цементованных и нецементованных зубьев представлены на рис.1. Напряжения определялись на поверхности и в поперечном сечении зубчатых колес. Для удобства рассмотрения напряжений в большинстве случаев анализировалось только одно колесо (нижнее), а второе виртуально убиралось. Основное внимание уделено напряжениям Maximum Principal Stress; Normal Stress; Shear Stress. В отдельных случаях определялись деформации в зонах контакта. Напряжения Maximum Principal Stress приняты в качестве критерия оценки изгибной прочности. Растягивающие напряжения являются источником возникновения и развития трещины, приводящей к разрушению. Напряжения Maximum Principal Stress и Normal Stress Y имеют практически одну зону распространения – основание ножки зуба. Максимум напряжений для цементованного зуба располагается на границе, соответствующей глубине эффективной толщины слоя. На поверхности ножки цементованного зуба даже при перегрузках остаются сжимающие напряжения. С увеличением толщины цементованного слоя и изгибающего момента зона растягивающих напряжений увеличивается, сдвигаясь вглубь. При отсутствии изгибающего момента под цементованным слоем всегда есть область растягивающих напряжений (Normal Stress Y). Величина этих напряжений и область распространения повышается с ростом глубины цементации.

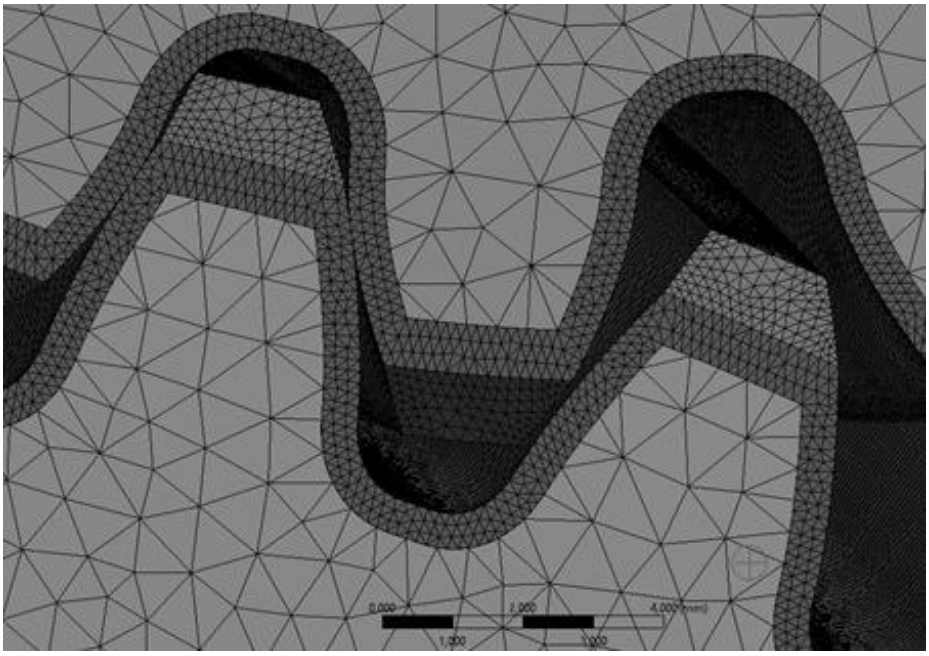


Рис. 1 – Сетка на цементации

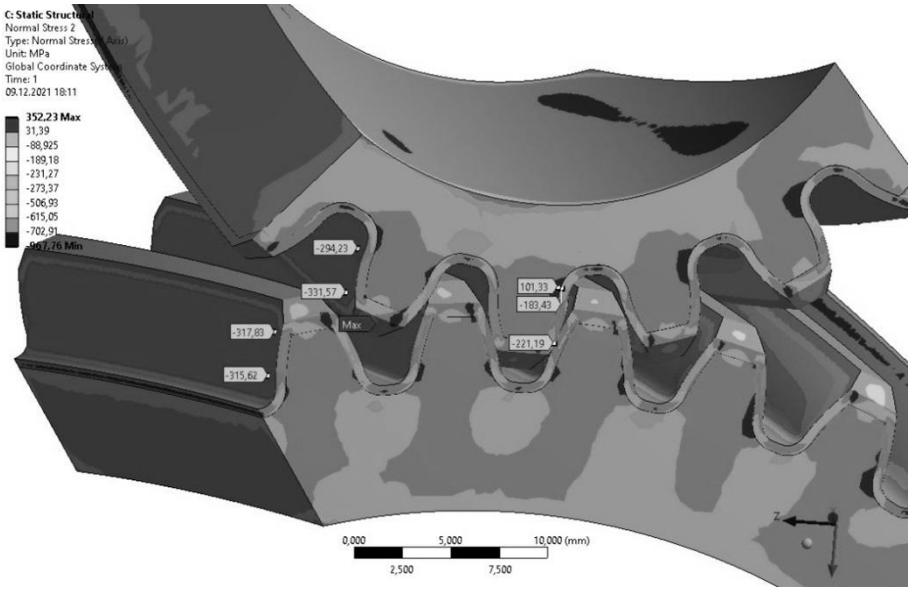


Рис. 2 – Normal Stress Y

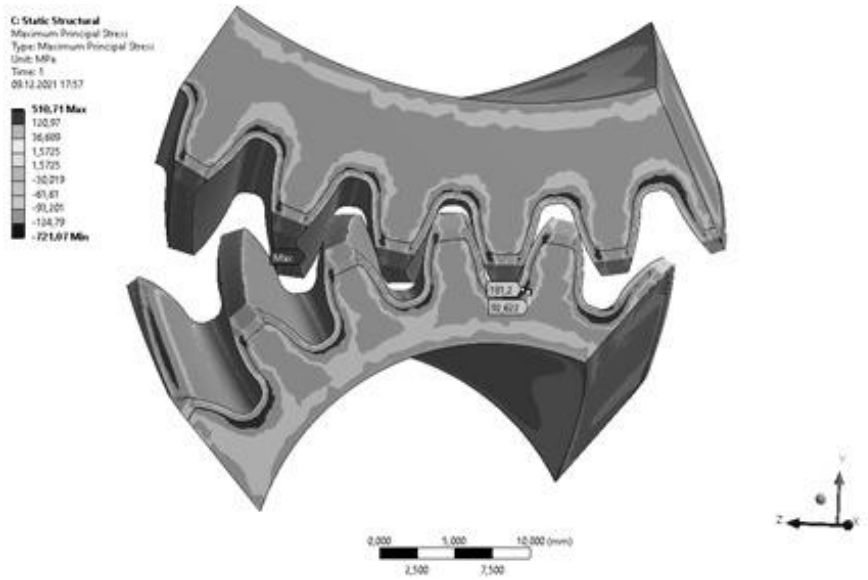


Рис. 3 – Maximum Principal Stress

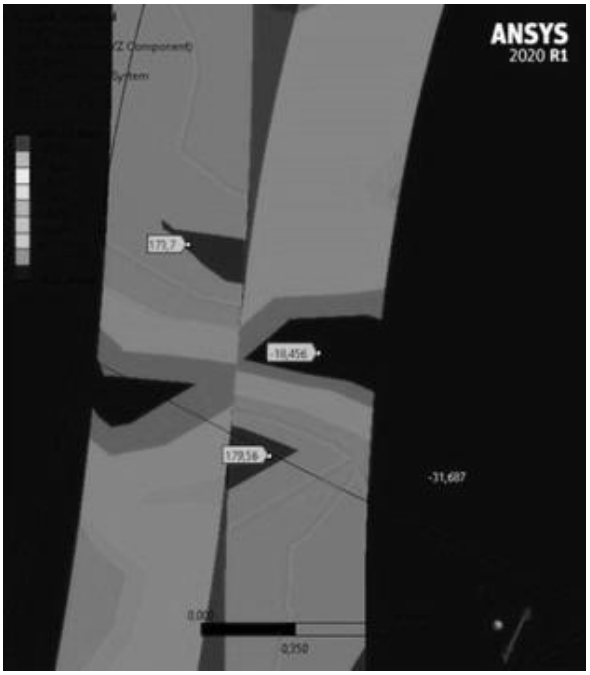


Рис. 4 – Картина контактного зацепления

Силовой расчет в программе ANSYS зубчатого зацепления не учитывает особенностей материала (различного рода включения, макро- и микропористость, структурная неоднородность) для зубчатых колес, поскольку это связано с технологией производства заготовок. Ухудшить качество зубчатых колес может и механическая обработка, и химико-термическая обработка. Знак и величина ОН зависят, например, от применяемой марки стали и технологии термической обработки после цементации. С учетом этого расчет в ANSYS дает наилучшие

(завышенные) результаты, хотя имеет четкое физическое обоснование. Получаемая в результате расчета картина НДС указывает на слабые места конструкции и применяемых технологий. Так, при анализе работы цементованных зубчатых колес в литературе очень мало уделяется внимания растягивающим ОН (величине и области расположения). Именно зоны с растягивающими ОН являются потенциальными очагами разрушений. Оценка работоспособности колес по конечному результату часто вуалирует причины разброса в испытаниях.

Проверочный силовой расчет зубчатого зацепления в ANSYS производится на основе справочных данных о материалах, используемых для зубчатых колес: марка стали, механические свойства после различных режимов термической и химико-термической обработки. Основной источник — марочник сталей и сплавов, а также работы типа.

Вывод

1. Основным критерием для оценки изгибной выносливости являются наибольшие растягивающие напряжения (Maximum Principal Stress). Напряжения MPS получаются немного больше, чем рассчитанные по общепринятой методике, но меньше Normal Stress, что вполне нормально.
2. Оценка контактной выносливости по касательным напряжениям (Shear Stress) в зоне контакта согласуется со значением допустимых контактных нагрузок и имеет вполне определенный физический смысл
   (см. табл. 1, рис. 2).
3. Цементованное зубчатое колесо является биметаллической конструкций: цементованный слой — слой из высокопрочного материала с соответствующими характеристиками механических свойств; сердцевина — подложка цементованного слоя — низкоуглеродистая сталь с уровнем прочности, соответствующим составу (Св = 500...1 200 МПа).

Библиографический список

1. С.И.Каратушин, Н.А.Бильдюк – Проверочный силовой расчет в ANSYS зубчатого зацепления. – Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – Москва. изд. МТГУ им. Н. Э. Баумана.

2. ГОСТ 21354-87 Библиографическая запись. передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего закрепления [Текст]. – Москва. ИПК Изд-во стандартов, 1993
3. В.А.Бруяка, В.Г.Фокин – Инженерный анализ в ANSYS Workbench [Текст]. – Самара. Самарский государственный технический университет, 2013
4. Санников В.А. Численное моделирование физических процессов в ограниченных средах: учебное пособие. / В.А. Санников. Балт. гос. техн. ун-т. - СПб., БГТУ, 2008-174с.
5. Павлов А. С. - Решение задач механики деформируемого твёрдого тела в программе ANSYS [Текст] : практикум [для вузов] / А. С. Павлов ; БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова. - Изд. 2-е, испр. и доп. - СПб. : [б. и.], 2020-33с.

Bibliographic list

1. S.I.Karatushin, N.A.Bildyuk – Verification power calculation in ANSYS gearing. – News of higher educational institutions. Mechanical engineering. – Moscow. Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University.
2. GOST 21354-87 Bibliographic record. gear gears cylindrical involute external fastening [Text]. – Moscow. IPK Publishing House of Standards, 1993
3. V.A.Brujaka, V.G.Fokin – Engineering analysis in ANSYS Workbench [Text]. – Samara. Samara State Technical University, 2013
4. Sannikov V.A. Numerical modeling of physical processes in limited environments: a textbook. / V.A. Sannikov. Baltic State Technical University un-T. -SPb., BSTU, 2008-174s.
5. Pavlov A. S. - Solving problems of deformable solid mechanics in the ANSYS program [Text] : practicum [for universities] / A. S. Pavlov ; BSTU "VOENMEH" named after D. F. Ustinov. - 2nd Ed., ispr. and dop. - SPb.: [B. I.], 2020-33s.

© Чирков И.С., Вересов Д.К., Расчупкина Т.В., 2022 Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №7/2022

Для цитирования: Чирков И.С., Вересов Д.К., Расчупкина Т.В.Проверочный расчет косозубого зубчатого зацепления// Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №7/2022