

История одного зубчатого зацепления.... Или как ему было без корригирования.

А также небольшой экскурс к бортовой передаче танка Т-34.

Уже больше 23 лет я занимаюсь разработкой приложений для расчета и проектирования зубчатых передач, поэтому мне постоянно приходится сталкиваться с разнообразными схемами конструкций, наборами исходных данных и примерами расчетов. Я много общаюсь с пользователями, среди которых и конструкторы, и студенты, и ученые. Кому-то требуется консультация, кто-то высказывает пожелания к функционалу... В общем, поводов для взаимовыгодного общения множество.

Недавно из славной обители российских оружейников города-героя Тулы ко мне поступили данные для расчета зубчатой передачи (рис. 1).

Геометрический расчёт		Ведущее колесо	Ведомое колесо
Наименование и обозначение параметра			
1. Число зубьев	z_1, z_2	16	31
2. Модуль, мм	m_n	14	
3. Угол наклона зубьев на делительном цилиндре	β	0 ° 0 ' 0 "	
4. Направление линии зуба ведущего колеса	—	прямое	
5. Угол профиля зуба исходного контура	α	20 ° 0 ' 0 "	
6. Коэффициент высоты головки зуба исходного контура	k_a^*	1	
7. Коэффициент радиального зазора исходного контура	c^*	0.25	
8. Коэффициент радиуса кривизны переходной кривой в граничной точке профиля зуба исходного контура	ρ_f^*	0.38	
9. Ширина зубчатого венца, мм	b_1, b_2	150	140
10. Коэффициент смещения исходного контура	$x_{1,2}$	0	0.3
11. Диаметр измерительного ролика, мм	D_1, D_2	23.896	23.896
12. Инструмент для обработки	—	рейка	рейка
13. Параметры инструмента	—		

Рис. 1

На первый взгляд передача — как передача, ничего особенного.

Имея в арсенале мной же разработанное средство проектирования и расчета механических передач систему «Валы и механические передачи 2D», я выполнил расчет этой передачи.

Результаты показали, что зубья одной из шестерен подрезаны (рис. 2).

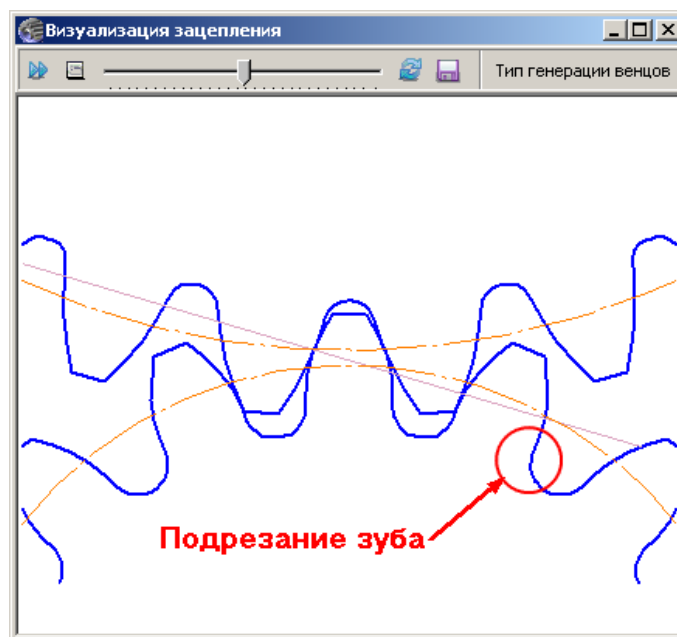


Рис. 2

Кроме того выяснилось, что в зацеплении имеется значительная разница удельных скольжений в нижних точках активных профилей зубьев, что приводит к повышенному износу зубьев, повышенным теплотерям и т.п.

Удельное скольжение профилей зубьев в нижних точках активных профилей зубьев	θ_p	-7,69226	-1,43617
--	------------	----------	----------

Одним из способов устранения этих проблем могло бы стать корригирование зубчатых колес.

Сущность корригирования сводится к использованию в работе различных участков одной и той же эвольвенты. Корригирование производится путем изменения положения (смещения) инструмента относительно заготовки в станочном зацеплении. Передачи со смещением позволяют без дополнительных материальных затрат стандартным инструментом изменять форму и размеры зубьев, улучшать качественные показатели и повышать нагрузочную способность передачи.

Параметрами, характеризующими величину корригирования зубчатой пары, являются коэффициенты смещения исходного контура X_1 и X_2 . Эти коэффициенты в долях модуля показывают расстояния от делительной прямой производящей рейки до делительной окружности зубчатого колеса в станочном зацеплении.

Нахождение коэффициентов смещения X_1 и X_2 , при которых передача будет иметь максимально возможную нагрузочную способность, является ответственной и сложной задачей проектирования эвольвентных зубчатых передач.

Рассчитаем коэффициенты смещения предоставленной передачи. Для этого нажмем лишь одну кнопку — остальное система «Валы и механические передачи 2D» сделает сама.

В первую очередь будет построен блокирующий контур, который представляет собой набор линий в системе координат X_1 и X_2 . Блокирующий контур ограничивает область допустимых значений коэффициентов смещения X_1 и X_2 для передачи с заданными числами зубьев Z_1 и Z_2 . Поле контура – это графическое представление области существования передачи, в которой будет обеспечена её геометрически и кинематически правильная работа.

На поле блокирующих контуров нанесено два типа линий:

- линии-ограничения предельных значений качественных показателей колёс и передачи;
- линии качественных показателей передачи и геометрических параметров колёс.

Все линии блокирующего контура подписаны. Чтобы увидеть название, достаточно подвести курсор мыши к линии, представляющей интерес.

Для работы с окном блокирующего контура предусмотрен ряд сервисных возможностей: окно можно выносить за пределы модуля расчетов, менять его размеры, увеличивать и уменьшать масштаб изображения блокирующего контура, не меняя размеры самого окна.

... Вернемся к нашему расчету и рассмотрим положение точки, соответствующей значениям коэффициентов смещения зубчатых колес рассчитываемой передачи $X_1 = 0$ и $X_2 = 0,3$ (рис. 3).

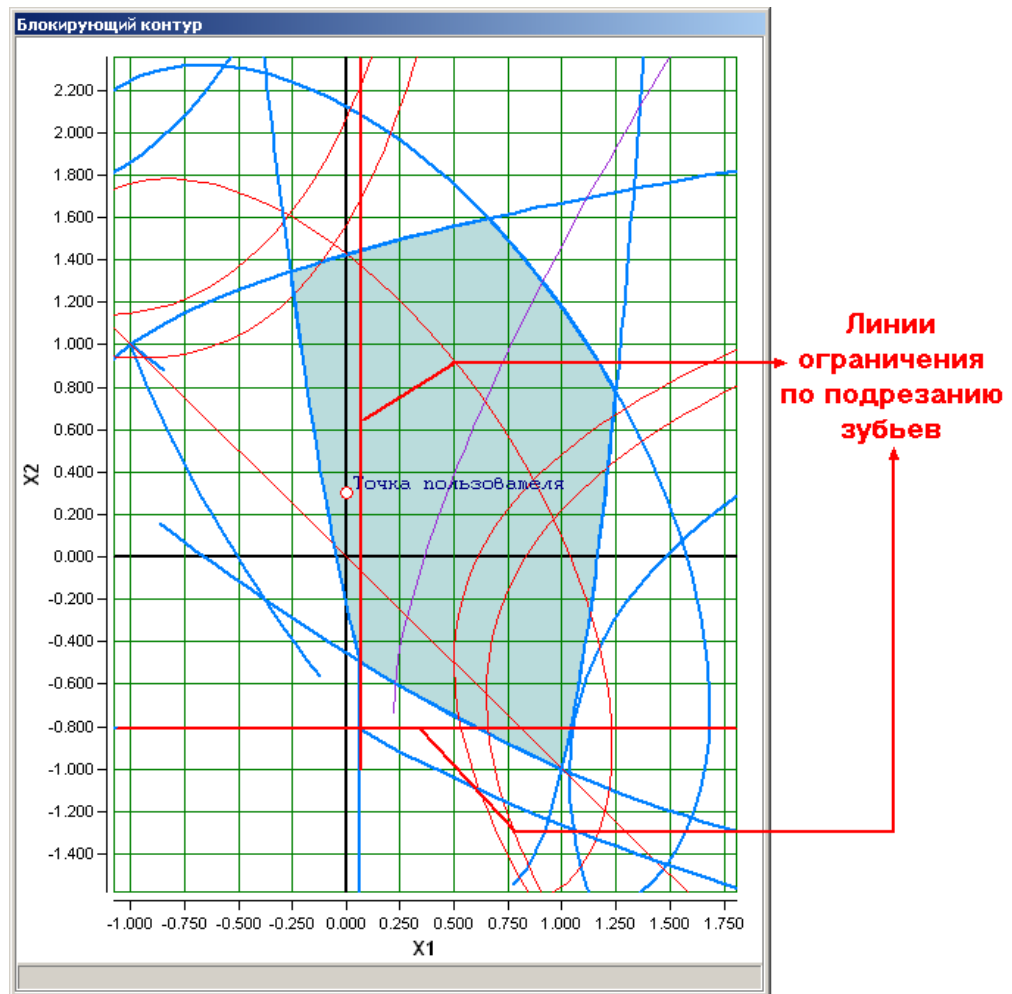


Рис.3

Явно видно, что точка находится в зоне допустимого подрезания. Хотя подрезание и допустимое, оно в любом случае ослабляет зуб.

Воспользуемся возможностями системы «Валы и механические передачи 2D» и попробуем подобрать коэффициенты смещения, при которых условия работы передачи будут более комфортными. Для этого запустим многокритериальный расчет зубчатого зацепления, цель которого – поиск множества значений X_1 и X_2 , а также значений параметров работоспособности передачи для всех возможных сочетаний следующих критериев:

- контактной прочности (запасу прочности по контактным напряжениям);
- прочности по изгибу (запасу прочности по изгибным напряжениям);
- равнопрочности по изгибу ведущего и ведомого колеса;
- износостойкости и наибольшему сопротивлению заеданию;
- плавности работы передачи.

Значимость этих критериев при расчете принята одинаковой.

Расчёт и выбор коэффициентов смещения

Параметры передачи: $z_1 = 16$, $z_2 = 31$, $m_n = 14$, $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $b_1 = 150$, $b_2 = 140$, Расчётная нагрузка: $T_{\text{жж}} = 10600 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $n_1 = 78 \text{ об/мин}$

Ограничения: $s_{\text{вс}1} \geq 0.4 \cdot m_n$, $s_{\text{вс}2} \geq 0.4 \cdot m_n$, $\varepsilon_\alpha \geq 1.2$

По рекомендациям ГОСТ 16532-70 (Приложение 2) для кинематических передач Ввод вручную
 $x_1 = 0.3$, $x_2 = -0.3$ $x_1 = 0$, $x_2 = 0.3$

По рекомендациям ГОСТ 16532-70 (Приложение 2) для силовых передач По рекомендациям ISO
 $x_1 = 0.5$, $x_2 = 0.5$ $x_1 = 0.42$, $x_2 = -0.03$

По методике многокритериальной оптимизации зубчатого зацепления (автор - Голованов В.А.)
(Вес критериев принят одинаковым)

	Критерии оптимизации					Коэффициенты зазора прочности			Удельное скольжение		Коэффициент торцового перекрытия	Нормальная толщина зуба на поверхности вершин		Угол зацепления	Межосевое расстояние	Диаметр вершин				
	*1	*2	*3	*4	*5	x_1	x_2	контакт	изгиб	θ_{p1}		θ_{p2}	ε_α			$s_{\text{вс}1}$	$s_{\text{вс}2}$	$\alpha_{\text{нр}}$	d_{a1}	d_{a2}
22	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.047	-0.423	2.358	2.358	5.977	5.978	-132.436	-4.4148	1.6791	9.527	11.819	17°02'04"	323.344	252.532	449.372
23	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.6347	0.7396	2.777	2.777	8.198	8.197	-1.1095	-1.084	1.201	8.426	10.122	26°31'40"	345.537	264.367	477.303
24	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.2287	-0.5776	2.345	2.345	6.456	5.732	-5.5975	-5.5971	1.6305	8.251	11.978	17°17'11"	323.784	257.74	445.164
25	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.6415	0.7299	2.776	2.776	8.228	8.175	-1.0934	-1.0953	1.201	8.355	10.162	26°31'03"	345.506	264.577	477.05
26	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.069	-0.497	2.324	2.324	6.019	5.859	-223.8261	-5.2647	1.6908	9.551	12.037	16°31'57"	322.491	252.898	447.051
27	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.832	0.425	2.744	2.744	9.145	7.536	-0.6909	-1.4816	1.201	6.077	11.188	26°06'08"	344.271	270.641	469.245
28	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.4907	0.4095	2.714	2.714	7.541	7.492	-1.4747	-1.4176	1.3161	7.607	10.14	24°41'55"	340.289	263.111	470.839
29	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.6035	0.6654	2.765	2.765	8.048	8.032	-1.1732	-1.1491	1.2263	8.194	10.11	26°08'45"	344.4	264.169	475.901
30	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.0499	-0.421	2.361	2.361	5.985	5.982	-88.2853	-4.3836	1.677	9.495	11.806	17°04'51"	323.425	252.638	449.451
31	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.3498	0.1509	2.643	2.643	6.984	6.984	-2.1371	-1.7964	1.4184	7.522	10.295	22°52'32"	335.549	260.873	465.304
32	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.2283	-0.5814	2.342	2.342	6.454	5.726	-5.6571	-5.6568	1.6317	8.267	11.99	17°14'51"	323.716	257.71	445.04
33	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.6416	0.7298	2.776	2.776	8.228	8.175	-1.0933	-1.0954	1.201	8.354	10.162	26°31'02"	345.506	264.579	477.048
34	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.064	-0.493	2.323	2.323	6.007	5.865	-4326.368	-5.2354	1.692	9.597	12.042	16°31'01"	322.465	252.734	447.138

Тип зацепления: Равноосищенное (30)

*1) Контактная прочность
 *2) Прочность по изгибу
 *3) Равнопрочность по изгибу зубьев ведущего и ведомого колеса
 *4) Износостойкость и наибольшее сопротивление заеданию (выравнивание удельных скольжений в нижних точках активных профилей зубьев)
 *5) Плавность работы (максимальное значение коэффициента перекрытия)

Выполнив расчет и проанализировав результаты, выберем точку со значениями $X_1 = 0,6416$ и $X_2 = 0,7298$ (рис. 4).

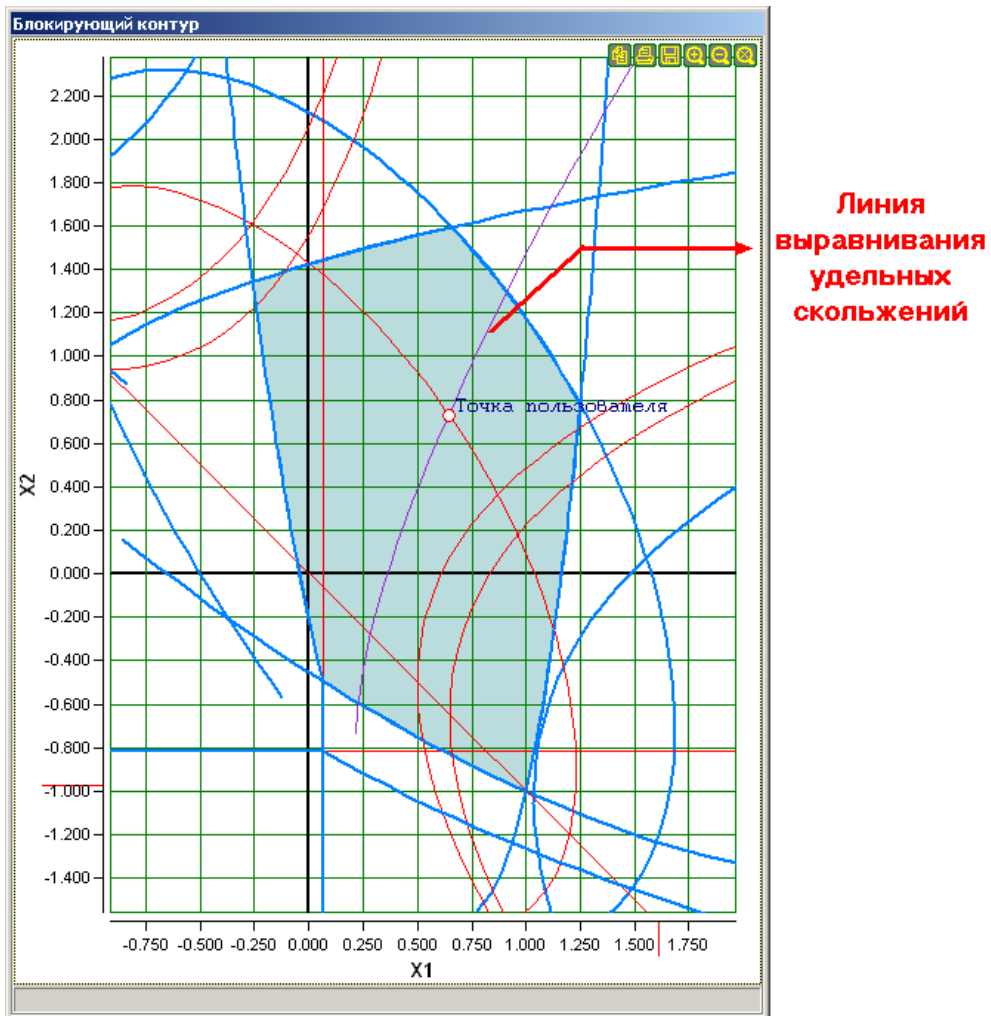


Рис. 4

Выбор именно этой точки объясняется следующим: при указанных значениях коэффициентов смещения передача обладает достаточными запасами прочности по напряжению и изгибу. Кроме того, на блокирующем контуре указанная точка располагается на линии выравнивания удельных скольжений. Это указывает на то, что в точке контакта зубьев износ будет минимизирован, и теплотери будут также снижены.

Удельное скольжение профилей зубьев в нижних точках активных профилей зубьев	θ_p	-1,09325	-1,0954
--	------------	----------	---------

Что касается ресурса, то у передачи с рассчитанными коэффициентами смещения он увеличится примерно на 30% по сравнению с исходной передачей.

Итак, правильное корригирование зубчатых колес уже дало неплохие результаты (рис. 5).

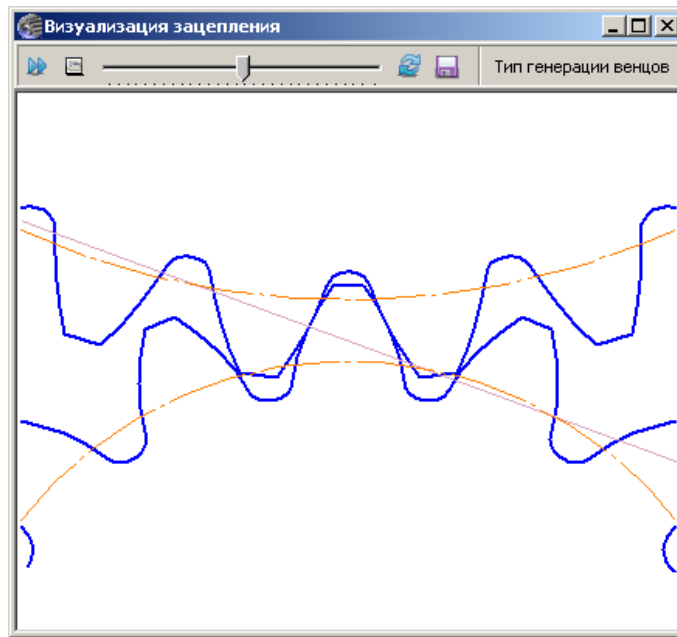


Рис. 5

Но и их можно улучшить, используя, например, нестандартный исходный контур. Исходные данные для расчета передачи с нестандартным исходным контуром приведены на рисунке 6.

Наименование и обозначение параметра		Ведущее колесо	Ведомое колесо
1. Число зубьев	z_1, z_2	16	31
2. Модуль, мм	m_n	14	
3. Угол наклона зубьев на делительном цилиндре	β	0 ° 0 ' 0 "	
4. Направление линии зуба ведущего колеса	—	прямое	
5. Угол профиля зуба исходного контура	α	18 ° 15 ' 30 "	
6. Коэффициент высоты головки зуба исходного контура	h_a^*	1.4968	
7. Коэффициент радиального зазора исходного контура	c^*	0.25	
8. Коэффициент радиуса кривизны переходной кривой в граничной точке профиля зуба исходного контура	ρ_f^*	0.2362	
9. Ширина зубчатого венца, мм	b_1, b_2	150	140
10. Коэффициент смещения исходного контура	$x_{1,2}$	1.4757	2.0416
11. Диаметр измерительного ролика, мм	D_1, D_2	23.896	23.896
12. Инструмент для обработки	—	рейка	рейка
13. Параметры инструмента	—		

Рис. 6

То, как будут выглядеть зубья при использовании нестандартного исходного контура, показано на рисунке 7.

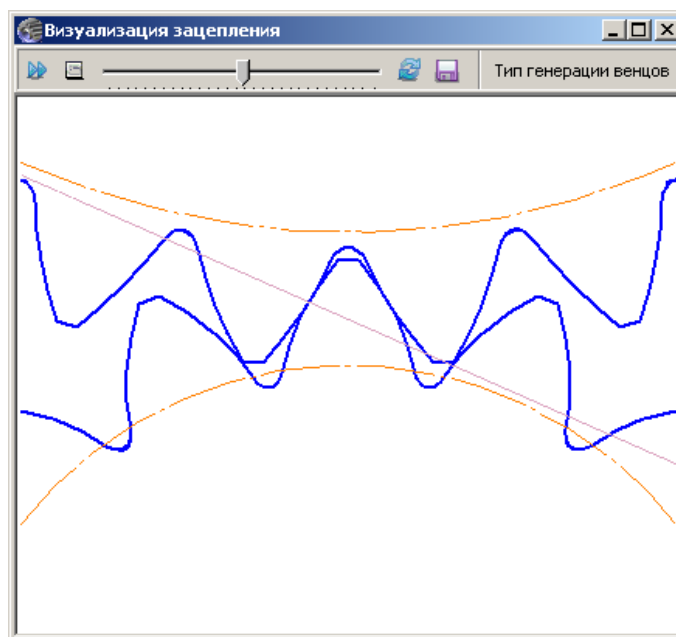


Рис. 7

Также расчет показал, что ресурс передачи с нестандартным исходным контуром по сравнению с исходным вариантом передачи увеличится в 3 раза.

Справедливости ради нужно сказать, что корригирование зубчатых колес и применение нестандартного исходного контура привело к увеличению межосевого расстояния зубчатой передачи. Насколько это критично — решать конструкторам в каждом конкретном случае...

Для подтверждения истинности полученных результатов я выполнил прочностной расчет шестерни с меньшим количеством зубьев (16) в системе прочностного анализа APM FEM.

Была рассчитана модель шестерни в трех вариантах:

- шестерня, соответствующая исходному варианту, пришедшему из Тулы;
- корригированная шестерня;
- корригированная шестерня с нестандартным исходным контуром.

Результаты расчета в виде распределения коэффициентов запаса усталостной прочности по зубу представлены на рисунках 8, 9, 10 соответственно.

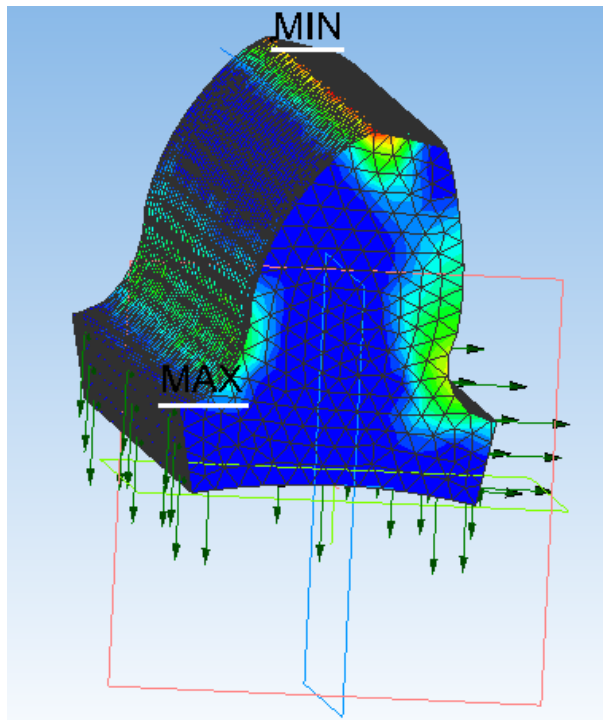


Рис. 8

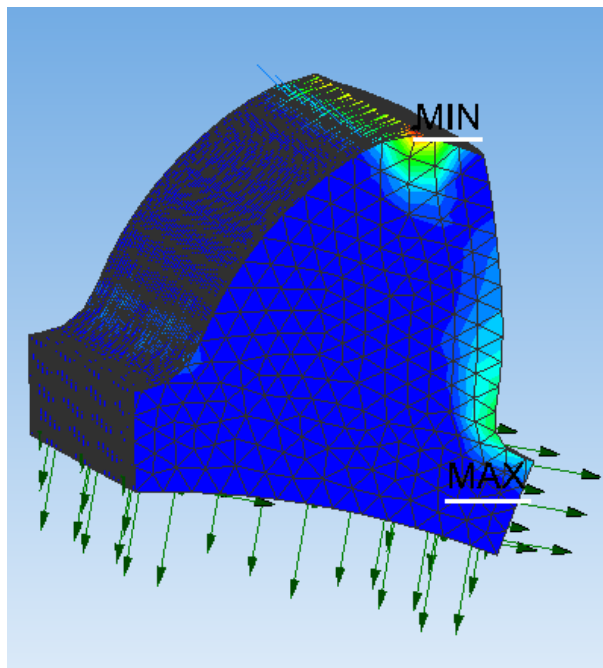


Рис. 9

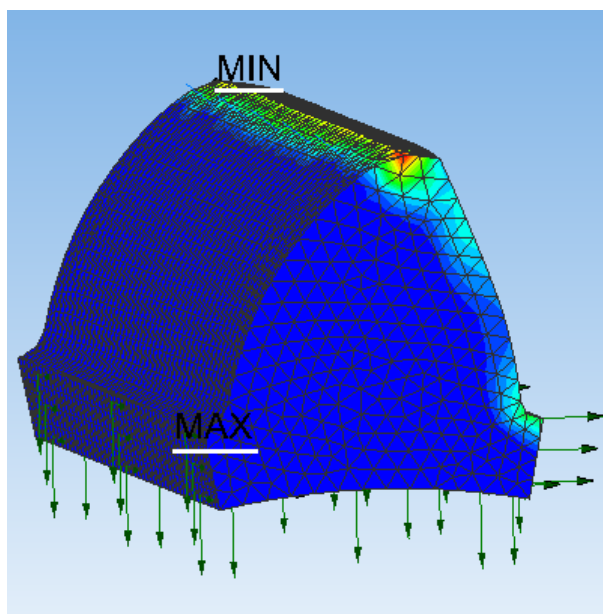


Рис. 10

Как и предполагалось, самый непрочный зуб оказался у исходного варианта шестерни, самый прочный — у скорректированной шестерни с нестандартным исходным контуром.

Из всего изложенного следует вывод — подбор «правильных» коэффициентов смещения при расчете зубчатых передач является простым и эффективным способом повышения надежности и увеличения срока службы зубчатых передач.

Из истории бронетанковой техники

Выполняя расчеты зубчатой передачи и анализируя их результаты, я припомнил один исторический факт. Во время Великой Отечественной войны самым распространенным танком Советской Армии был Т-34. Несмотря на множество достоинств Т-34, была у него своя «ахиллесова пята» — бортовые передачи. После относительно небольшого пробега и увеличения эксплуатационных нагрузок они часто выходили из строя. Что примечательно, однотипные поломки были характерны для танков, выпускаемых на разных заводах. Следовательно, можно предположить, что дело не в особенностях эксплуатации и не в производственном браке, а в несовершенстве конструкции...

Историческая справка. Источник. http://www.t34-info.ru/?page_id=213

Недавно мы с тов. МОРОЗОВЫМ были у тов. СТАЛИНА. Товарищ СТАЛИН обратил наше внимание на то, что танки противника свободно перебрасываются на большие расстояния, а наши машины хотя и лучше, а обладают тем недостатком, что если пройдут 50 или 80 километров, так

их начинают чинить. К чему это относится? Это относится к механизмам управления; это относится, как называет тов. СТАЛИН, к механизмам передачи, и он, приводя сравнение танка Т-3, находящегося на вооружении немецкой армии, который хуже по бронестойкости, который хуже и по другим качествам, и по расположению экипажа, который не имеет такого прекрасного мотора, который имеется на танке Т-34, причем бензиновый, а не дизельный, ставит вопрос — почему у них лучшие отработаны механизмы передачи?

Товарищ СТАЛИН дал директивные указания конструкторам, дал директивные указания Народному Комиссару — тов. ЗАЛЬЦМАНУ, директорам заводов, и обязал в ближайшее время провести исправление всех дефектов. По этому вопросу имеется специальное решение Государственного Комитета Оборона и указания наркомата. Несмотря на все эти решения, которые были, решения Правительства, приказы Народного Комиссара Танковой Промышленности, несмотря на неоднократные указания из армейских частей, указания Главного Бронетанкового Управления, занимающегося непосредственно эксплуатацией машин, — все эти дефекты на машинах продолжают повторяться... Нам надо вскрыть все эти недостатки, и на этой конференции надо внести свои предложения о том, как лучше и как быстрее доработать узлы машины, чтобы танк Т-34, который признан в армии, как хороший танк, сделать еще лучшей боевой машиной”.

Все участники конференции с большим вниманием прослушали доклад главного инспектора НКТП Г.О. Гутмана. В докладе отмечалось, что за два месяца работы главной инспекции наркомата, которая занималась вопросами эксплуатации машин в войсковых частях, были получены рекламации на 200 танков Т-34. Причем наиболее ярко выраженным дефектом является разрушение бортового редуктора. ” По данным 1 отдела Бронетанкового Управления с 1.1 по 25.VIII — имелось в армии 188 случаев разрушения бортовой передачи (бортового редуктора) на танке Т-34... Разрушение бортовой передачи происходит на танках всех заводов, выпускающих 34-ю машину”.

Я предположил, что причиной поломок могло стать подрезание зубьев на ведущей шестерне (число зубьев у нее равно 10).

Чтобы устранить подрезание, надо было всего-то корректно применить корригирование. К тому же книга на эту тему была издана еще в 1935 году (ее автором был знаменитый Леонид Николаевич Решетов) по результатам исследований проведенных по поручению Оргкомитета Всероссийской выставки зуборезного дела, да и в Европе корригирование успешно применялось!

Судя по сборочному чертежу (рис. 11) и фотографиям (рис. 12 и 13), сделанным в 1940 году, можно предположить, что шестерня имела коэффициент смещения $+0,1$, а колесо $-0,1$. При этом для изготовления зубчатых колес был применен исходный контур с углом профиля 15° . Такой исходный контур был широко распространен в 30-е годы.

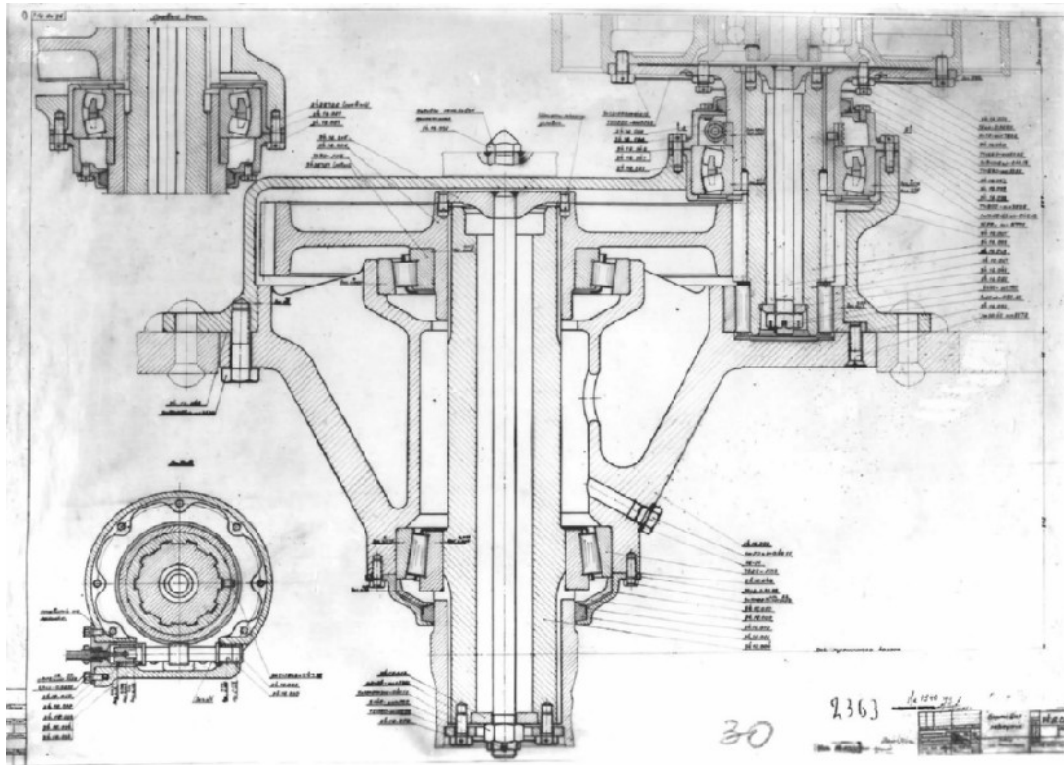


Рис. 11

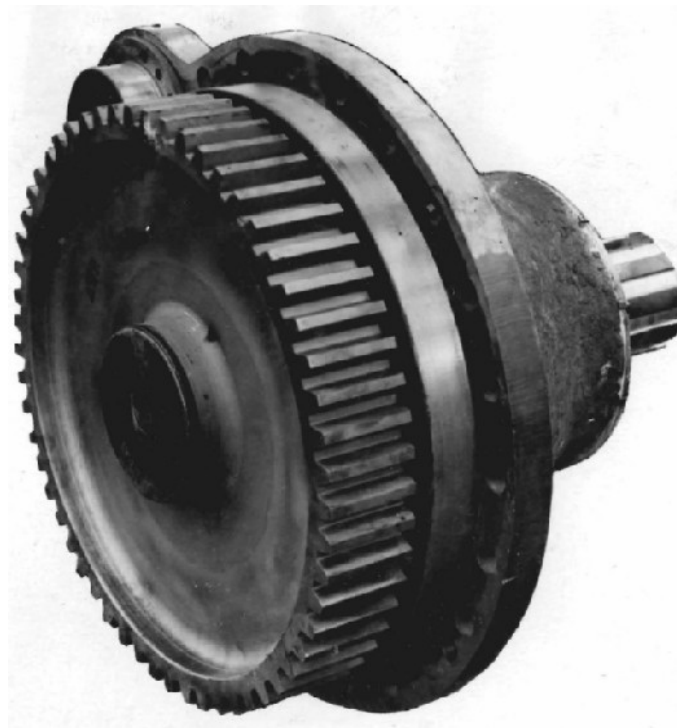


Рис. 12

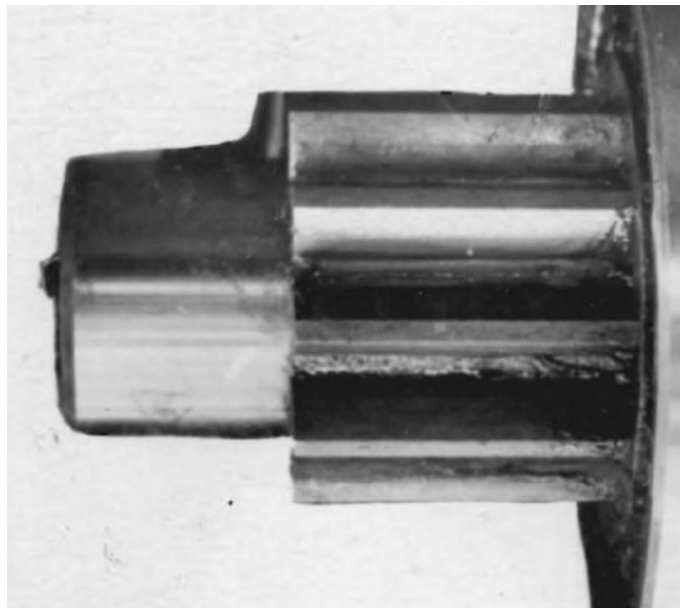


Рис. 13

Зубья в бортовом редукторе танка Т-34 выглядели так, как показано на рисунке 14 .

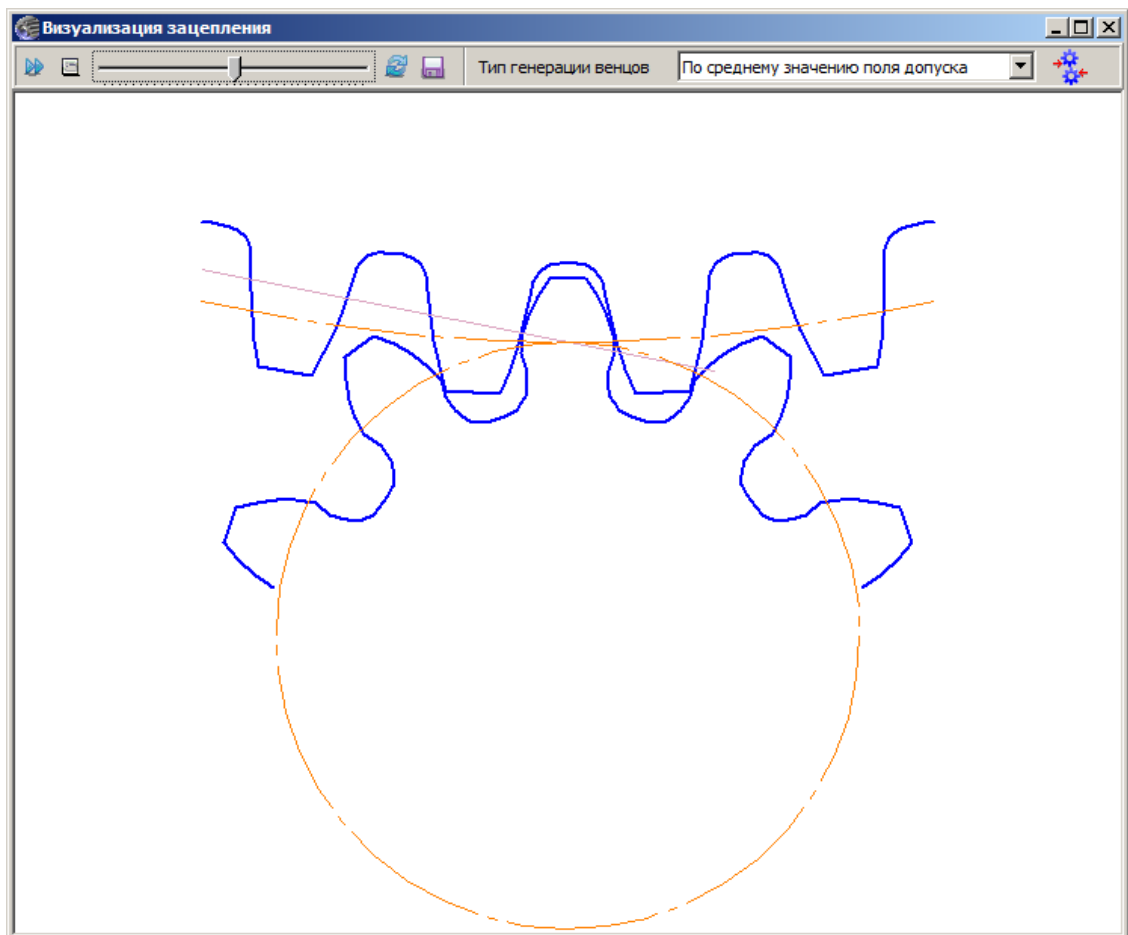


Рис. 14

А после применения исходного контура с углом профиля 20° и корригирования они могли бы выглядеть так, как показано на рисунке 15.

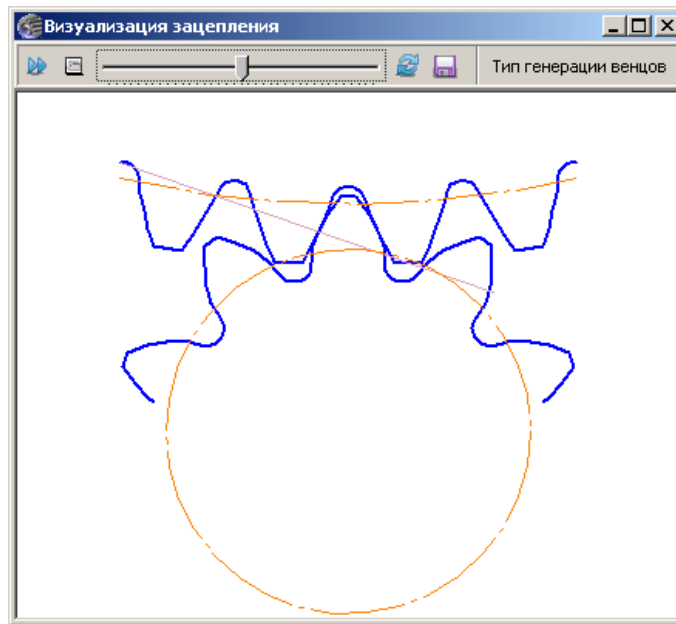


Рис. 15

Разница, безусловно, заметна.

К тому же, после корригирования коэффициент запаса прочности по изгибу увеличился бы в 1,5 раза, а ресурс - в несколько раз!

Ну а если вместе с корригированием использовали бы нестандартный исходный контур и применили специальный инструмент, зубья выглядели бы так, как показано на рисунке 16.

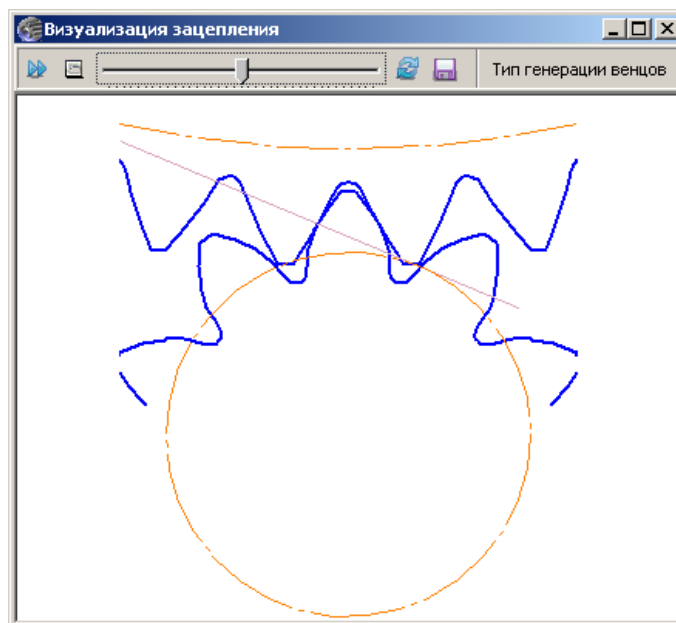


Рис. 16

Прочность в этом случае увеличилась бы в 1,8 раз, а ресурс — как минимум в 10.

Увеличение межцентрового расстояния (на 6мм после корригирования и на 14мм после корригирования и применения нестандартного исходного контура), конечно, привело бы к необходимости изменения конструкции бортового редуктора, но, на мой взгляд, ожидаемый эффект того бы стоил! Но война диктовали свои правила. Времени на эксперименты не было, цель была одна — победа.

Танк Т-34, который изначально имел довольно-таки сложную конструкцию, в процессе серийного выпуска был максимально приспособлен к существующему в годы войны производству. Танки выпускались везде, где только можно, в том числе и на неспециализированных предприятиях силами малоквалифицированных рабочих кадров. Шла плановая работа по уменьшению номенклатуры задействованного оборудования, используемых деталей, снижению трудоемкости.

По-видимому, именно в простоте конструкции крылся секрет популярности этой машины и у танкистов, и у производителей. Нетребовательность в эксплуатации и ремонтпригодность Т-34 просто поражали. В случае необходимости (не во всех конечно случаях) танк можно было «привести в чувства» и кувалдой, и ломом, а где-то и сапогом. Одним словом, Т-34 был русским танком для русского человека...

А мне, как русскому человеку, очень жаль, что я не могу оказаться в далеком 1941 году вместе с мощной вычислительной техникой и современными средствами для расчета и проектирования передач и помочь конструкторам тех КБ хоть чем-то!