

УДК 621.83
DOI: 10.12737/20251

В.П. Тихомиров, А.Г. Стриженок

МЕТОДИКА ВЫБОРА МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС

Предложена методика выбора материала из низкоуглеродистых легированных сталей для изготовления зубчатых колес осевых редукторов тепловозов 2ТЭ25А, ТЭМ18.

Ключевые слова: сталь, цементация, физико-механические характеристики, цилиндрические зубчатые колеса, износостойкость, долговечность.

V.P. Tikhomirov, A.G. Strizhenok

METHODS OF MATERIAL CHOICE FOR COG-WHEELS

The method for material choice of low-carbon alloyed steel for manufacturing cog-wheels of axial reduction gear of locomotives of 2TE25A, TEM 18 is considered. The method allows choosing the best material for cog-wheels taking into account basic physical stress-strain and tribological characteristics and operation conditions. The material choice is carried out on the basis of three criteria: value, strength, and wear-resistance for three kinds of steel. The procedure of material choice provides for the definition of the priority on every criterion. As an illustration there is shown an example. A priority and a relative priority of materials compared one after another on every criterion of

optimization are defined. With that end in view square matrices of connectivity are used. On the basis of data presented in the connectivity matrix there is defined a complex relative priority of competitive materials on the whole of totality of optimization criteria taking into account their weight. The offered method of material choice for heavy loaded cog-wheels allows choosing the best material reasoning from conditions of contact strength and life.

Key words: steel, case-hardening, physical and stress-strain characteristics, cylindrical cog-wheels, wear-resistance, durability (life).

Рассмотрим методику выбора подходящего материала из низкоуглеродистых легированных сталей 20ХН3А, 20Х2Н4А и 12Х2Н4А, применяемых при изготовлении зубчатых колёс. Указанные стали подвергаются цементации с последующей закалкой (нагрев и охлаждение в масле) и отпуском на воздухе. Твёрдость цементованного слоя (в зависимости от режима формирования) - HRC 57 ... 64, твёрдость сердцевины - HB 255 ... 420 (HRC > 30), толщина покрытия - 1,5 мм (минимальное значение).

В соответствии с техническими требованиями для колеса 2ТЭ25А.31.110.308, изготовленного из стали 20Х2Н4А, твёрдость сердцевины – HB > 294, а твёрдость цементованного слоя - HRC > 56. Толщина слоя - более 1,5 мм (1,6 ... 2,4 мм - для колеса ТЭМ 18.ДМ.035.15.133).

Использование других сталей, в частности 20ХН3А и 12Х2Н4А, и сравнительная оценка эффективности и целесообразности их применения требуют разработки методики выбора необходимого ма-

териала.

Будем полагать, что цементирование зубьев зубчатых колёс из сталей 20ХН3А и 12Х2Н4А даёт такие же физико-механические характеристики [1], как и для стали 20Х2Н4А. При одинаковых геометрических параметрах пары «шестерня - колесо» и физико-механических характеристиках цементованного слоя все сравниваемые стали имеют один и тот же предел контактной выносливости [2]:

$$\sigma_{H \text{ lim}} = 23 \bar{H}_{HRC},$$

где $H = (H_{HRC \text{ min}} + H_{HRC \text{ max}}) / 2$.

Примем во внимание следующие показатели, комплекс которых позволит выделить наилучший материал для зубчатых колёс. Стоимость колёс зависит от содержания легирующих компонентов. Так, цена никеля составляет около 15000 долларов США за тонну. С другой стороны, увеличение содержания хрома приводит к росту износостойкости. Изгибная выносливость (прочность и вязкость сердцевины) зависит от марки стали и её предела

прочности σ_6 .

Итак, рассматриваются три материала, которые сравниваются по трём критериям:

Методика выбора стали для зубчатых колёс

Пусть имеется три материала x_i , $i = 1, 2, 3$ (x_1, x_2, x_3), и три критерия оптимизации z_j , $j = 1, 2, 3$ (z_1, z_2, z_3 – стоимость, износостойкость, предел прочности сердцевины). Назначим вес (значимость) каждого из критериев α_j . Критерий z_1 имеет вес α_1 ($\alpha_1 = 3$), z_2 – α_2 ($\alpha_2 = 2$), z_3 – α_3 ($\alpha_3 = 2$).

риям: стоимости, износостойкости и прочности сердцевины. Требуется по этим трём критериям выбрать подходящий материал.

Определим приоритет и относительный приоритет сравниваемых материалов последовательно по каждому из критериев оптимизации. С этой целью используются квадратные матрицы смежности (табл. 3 – 5) [3] и рекомендуемые коэффициенты предпочтения (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты предпочтения

Варьирование критериев	x_i предпочтительнее x_{i+1}	x_{i+1} предпочтительнее x_i	x_i и x_{i+1} имеют равную предпочтительность
Незначительное	1,1	0,9	1
Среднее	1,5	0,5	1
Высокое	2	0,1	1

На основании данных, представленных в матрицах смежности, определяется комплексный относительный приоритет конкурирующих материалов по всей совокупности критериев оптимизации с учётом их веса:

$$C_i = \sum_{j=1}^3 (P^0 x_i / z_j) \alpha_j.$$

В табл. 2 приведены материалы и их показатели (предел прочности взят из [4]).

Таблица 2

Материалы и их показатели

Материал	Стоимость (содержание никеля в %)	Износостойкость (содержание хрома в %)	Предел прочности σ_6 , МПа
x_1 (сталь 20ХН3А)	3	1	900
x_2 (сталь 20Х2Н4А)	4	2	1100
x_3 (сталь 12Х2Н4А)	4	2	1200

Таблица 3

Матрица смежности по критерию z_1 (стоимость)

i	$j = 1$			$\sum a_{i,j}$	Px_1 / z_1	$P^0 x_1 / z_1$
	x_1	x_2	x_3			
x_1	1	1,5	1,5	4	11	0,44
x_2	0,5	1	1	2,5	7	0,28
x_3	0,5	1	1	2,5	7	0,28
Сумма					25	1

Таблица 4

Матрица смежности по критерию z_2 (износостойкость)

i	$j = 2$			$\sum a_{i,j}$	$УР_{x_2} / z_2$	$P^0_{x_2} / z_2$
	x_1	x_2	x_3			
x_1	1	0,5	0,5	2	5,5	0,216
x_2	1,5	1	1	3,5	10	0,392
x_3	1,5	1	1	3,5	10	0,392
Сумма					25,5	1

Таблица 5

Матрица смежности по критерию z_3 (предел прочности)

i	$j = 3$			$\sum a_{i,j}$	$УР_{x_3} / z_3$	$P^0_{x_3} / z_3$
	x_1	x_2	x_3			
x_1	1	0,5	0,5	2	5,5	0,22
x_2	1,5	1	0,5	3	8	0,32
x_3	1,5	1,5	1	4	11,5	0,46
Сумма					25	1

Комплексные критерии:

$$C_1 = 0,44 \cdot 3 + 0,216 \cdot 2 + 0,22 \cdot 2 = 2,192;$$

$$C_2 = 0,28 \cdot 3 + 0,392 \cdot 2 + 0,32 \cdot 2 = 2,26;$$

$$C_3 = 0,28 \cdot 3 + 0,392 \cdot 2 + 0,46 \cdot 2 = 2,54.$$

Таким образом, в данном случае лучшим материалом для зубчатых колёс является сталь 12Х2Н4А.

Пример. Тепловоз 2ТЭ25А. Колесо: 2ТЭ25А.31.110.308, модуль $m = 10$, число зубьев $z_2 = 73$, степень точности 7 – В, сталь 20Х2Н4А (цементация). Шестерня: 2ТЭ25А.31.100.001, модуль $m = 10$, число зубьев $z_1 = 20$, сталь 20Х2Н4А (цементация с твёрдостью HRC 56 ... 63 на глубину $h = 1,6 \dots 2,4$ мм).

Передаваемая мощность $P = 470$ кВт,

$$\delta = \frac{2N_e}{\pi} \left[\theta_1 \left(\ln \frac{2r_1}{\rho} + 0,407 \right) + \theta_2 \left(\ln \frac{2r_2}{\rho} + 0,407 \right) \right].$$

Здесь эквивалентная удельная нагрузка $N_e = F_n / b = F_{t2} / (b \cos 20^\circ)$; радиус кривизны $\rho = 1,128 \sqrt{\theta_2 r N_e}$; приведенный радиус колеса $r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$; механическая характеристика упругих свойств материа-

частота вращения $n = 2500$ об/мин, момент при трогании $T_{трог} = 11800$ Н·м, момент номинальный $T_{ном} = 10500$ Н·м, коэффициент динамичности $K_g = 1,5$. Передаточное отношение $u = z_2 / z_1 = 73 / 20 = 3,65$. Момент на шестерне $T_1 = 9550 P u / n = 9550 \cdot 470 \cdot 3,65 / 2500 = 6553$ Н·м. Момент на колесе равняется номинальному моменту: $T_2 = 10500$ Н·м. Рассмотрим вариант: цементованная шестерня и колесо без цементации.

Рассчитаем деформацию цементованной шестерни (сталь 20Х2Н4А) и колеса (сталь 45ХН, закалка ТВЧ, HRC 48 ... 54):

$$\theta_2 = \theta_1 + \theta_2 = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}.$$

Для стального колеса модуль упругости $E_2 = 2,04 \cdot 10^5$ МПа, модуль Юнга $\mu_2 = 0,3$. Для цементованного слоя модуль упругости $E_1 = 1,8 \cdot 10^5$ МПа, модуль Юнга $\mu_1 = 0,28$.

Радиусы зубчатых колёс:

$$r_1 = d_1 \sin 20^\circ / 2 = m z_1 \sin 20^\circ / 2 = 10 \cdot 20 \sin 20^\circ / 2 = 34,20 \text{ мм};$$

$$r_2 = m z_2 \sin 20^\circ / 2 = 10 \cdot 73 \sin 20^\circ / 2 = 124,83 \text{ мм}.$$

Окружную силу найдём как

$$F_{t2} = 2T_2 / d_2 = 2 \cdot 10500 \cdot 10^3 / (10 \cdot 73) = 28770 \text{ Н.}$$

Учитывая, что ширина шестерни $b = 140$ мм, получим

$$N_e = 28770 \cos 20^\circ / 140 = 193,107 \text{ Н/мм.}$$

Тогда

$$\rho = 1,128 \sqrt{\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} N_e} = 1,128 \sqrt{\left(\frac{1-0,3^2}{2,04 \cdot 10^5} + \frac{1-0,28^2}{2,04 \cdot 10^5} \right) \frac{34,20 \cdot 124,83}{34,20 + 124,83} 193,107} = 0,251 \text{ мм.}$$

Подставив значение ρ в исходное выражение, получим сближение $\delta \cong 7,3$ мкм. При толщине цементованного слоя $h_{min} = 1,5$ мм внедрение, равное 7,3 мкм, можно считать очень незначительным, поэтому цементованный слой считают упру-

гим полупространством (сплошным телом без покрытия).

Физико-механические характеристики цементованных зубьев должны соответствовать характеристикам цементованного слоя (табл. 6).

Таблица 6

Физико-механические свойства некоторых сталей, используемых при изготовлении зубчатых колёс

Сталь	Термообработка	Твёрдость рабочей поверхности	Твёрдость сердцевины	Глубина (толщина) цементованного слоя, мм
12Х2Н4А	Цементация (920-950 °С), закалка (780-800 °С, масло), отпуск (180 °С, воздух)	59...63 HRC	255...302 НВ	-
20ХН3А	Цементация (920-950 °С), нормализация (870-890 °С, воздух), отпуск (630-660 °С, воздух), закалка 790-810 °С, масло), отпуск (180-200 °С, воздух)	58...62 HRC	≥ 240 НВ	-
20Х2Н4А (ГОСТ 4543-71)	Цементация (920-950 °С), закалка (880-920 °С, масло), отпуск (630-660 °С, воздух)	Колесо - ≥ 56 HRC, шестерня - ≥ 58 HRC	≥ 30 HRC	1,5
45ХН (ГОСТ 4543-71)	Закалка ТВЧ	-	255...302 НВ	3...7 (во впадинах -1...2)

Таким образом, предложена методика выбора материала для тяжело нагруженных зубчатых колёс исходя из условия

контактной прочности и долговечности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марочник сталей и сплавов / под ред. В.Г. Со рокина. - М.: Машиностроение, 1989. - 640 с.
2. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчёты на прочность.
3. Алафердов, О.Х. Аналитический метод выбора

материалов в машиностроении / О.Х. Алафер дов, Е.О. Габриэлян // Изв. вузов. Машиностроение. - 1978. - № 2. - С. 99 - 102.

4. Марочник стали для машиностроения. ОМТРМ 0056 - 002 - 68.

1. Reference Book of Steel and Alloy / under the editorship of V.G. Sorokin. - M.: Mechanical Engineering, 1989. – pp. 640.
2. SARS 21354-87. Cylindrical Involute Gearings of External Tothing. Stress Calculations.
3. Alaferdov, O.H. Analytical method for material choice in mechanical engineering / O.H. Alaferdov,

- E.O. Gabrielyan // Proceedings of Colleges. Mechanical Engineering. - 1978. - № 2. – pp. 99 – 102.
4. Reference Book of Steel for Mechanical Engineering. OMTRM 0056 – 002 – 68.

Статья поступила в редколлегию 29.12.2015.

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета
Горленко О.А.*

Сведения об авторах:

Тихомиров Виктор Петрович, д.т.н., профессор кафедры «Детали машин» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 58-82-12.

Tikhomirov Viktor Petrovich, D.Eng., Prof. of the Dep. “Machinery” Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 58-82-12.

Стриженок Александр Георгиевич, к.т.н., профессор кафедры «Детали машин» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 58-82-12.

Strizhenok Alexander Georgievich, Can.Eng., Prof. of the Dep. “Machinery” Bryansk State Technical University Phone: (4832) 58-82-12.