

## Материали за изработване на зъбни колела на редуктори от общото машиностроене

Юлиян Димитров, Васко Добрев

*Materials for producing gears of reduction gear in general machine-building: The paper analyze and compare traditional for Bulgarian machine-building company steel and new steel grades for production of gears. Compared steels are: 40X, 18XГТ, 20MnCr5, 31CrMoV9, 42CrMo4. Examines the chemical composition, mechanical properties of steels an possible heat treatment. The study presents innovative steel Ovatec™277 (OVAKO).*

**Key words:** machine-building, reduction gear, steel, heat treatment, .

### ВЪВЕДЕНИЕ

Правилният избор на материал за изработката на машинни елементи е основен фактор за продължителна експлоатация и качествена работа на машините и механизмите. Подходящо избраните материали с необходимите механични показатели и химичен състав определят в голяма степен енергоемкостта и продължителността на процеса на изработването им, което включва вида на заготовката, технологията на механична обработка, технология на термообработка и др.

Целта на представената разработка е да представи последователен анализ на техническите, химически и механически показатели на традиционно използваните материали в българските машиностроителни фирми произвеждащи зъбни колела и редуктори и нови материали, използвани от фирми- производители от Европа. Въз основа на направения анализ да се направят изводи за оптимален избор на материал за изработка на серии зъбни колела и редуктори в условията на съвременната българска икономическа обстановка, които същевременно да са конкурентни на аналогичните изделия, произведени от европейски фирми .

### ИЗЛОЖЕНИЕ

Редукторите като механизми имат голямо приложение навсякъде в бита и промишлеността – добивна, преработваща, химическа, селското стопанство, хранително вкусова и др. Зъбните колела са основните съставни части на зъбните механизми като редуктори, моторредуктори и мултипликатори, предавателни кутии, открити зъбни предавки. От работоспособността на тези елементи до голяма степен зависят надеждността и експлоатационните качества на тези изделия.

Българските машиностроителни фирми имат дългогодишни традиции в машиностроителното производство и по-точно в редукторостроенето. Въпреки това в съвременните икономически условия и при голямата конкуренция на западните фирми, българските редуктори не са конкурентноспособни. Поради това е необходима оптимизация на определени параметри. Критериите за оптимизация се определят въз основа на задълбочен анализ на предимствата и недостатъците на българските и конкурентните изделия.

Основен критерий по който трябва да се направи сравнителен анализ между конкурентните изделия е изборът на материал за зъбните предавки в редукторите.

#### 1. Същност на проблема.

В последните петдесет години българските фирми производители на редуктори използваха за изработване на зъбни колела само определени марки стомани, най-използваните от които са: стомана 45, 40X, 18XГТ, 30XГТ, 12ХНЗА и др [1,7]. Тези марки отговаряха на стандарта БДС, съответстваха на ГОСТ и отговаряха на следната класификация [1,2,3]:

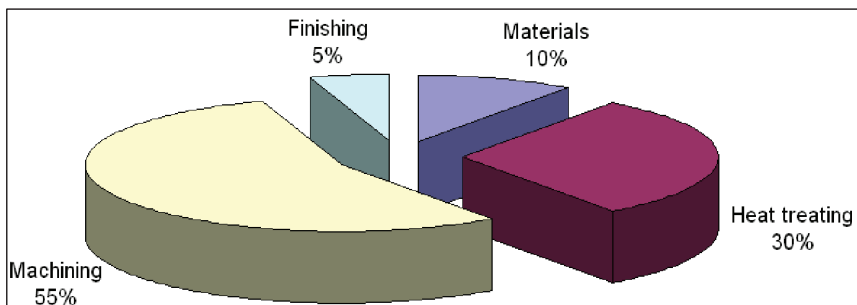
- Качественните въглеродни стомани, които имат повишени якостни и пластични свойства и се използват за неотговорни и среднотоварени зъбни колела за работа в некорозионни среди – марка 40, 45, 50 и др.

- Конструкционни легирани стомани се използват за работа в корозионни среди, за средно и тежкотоварени зъбни предавки. Използването на няколко легиращи елемента силно подобряват конструкционните свойства на стоманите – марка 40X, 40XН, 18ХГТ, 30ХГТ, 12ХНЗА, 40ХМ и др.

Причините за използването само на тези марки стомани са: технически (техните механични показатели), политически и икономически (свързаността на промишленото производство със СИВ и СССР)

След политическите и икономическите промени, в последните години започва и използването на материали отговарящи на немския стандарт DIN, които са еквивалентни или се доближават по химически състав да тези от ГОСТ и БДС.

Изборът на материал е в основата на съставянето на технологичния процес за механична обработка и термообработка. Това определя дълготрайността и енергоемкостта на процесите по изработването на готовите изделия. Всички тези фактори формират себестойността на изделията, като ги прави конкурентноспособни на пазара. За съжаление голяма част от българското производство не е конкурентно, поради което е необходимо да се анализират причините. Избора на материал е един от основните фактори формирани себестойността на изделията. Разходите за заготовка са около 10%, за машинна и довършваща обработка формират около 60% от производствените разходи и за термообработка са около 30%, всички зависещи от вида на материала [14,15]. Затова е необходимо да се анализират факторите, определящи тези разходи.



Фиг.1 Разпределение на разходите при изработване на зъбни колела.

## 2.Изисквания към материалите за изработване на зъбни колела.

Стоманите трябва да отговарят на две групи основни изисквания: технологични изисквания при производството им (обработваемост, деформируемост и термична податливост), експлоатационни изисквания (якост на умора, топлоустойчивост и износоустойчивост) [15].

Тези изисквания определят стоманите за зъбни колела да притежават в голяма степен следните характеристики:

- Да се уякчават добре и да се обработват лесно на машина;
- Податливост на термична обработка;
- Издръжливост на умора от огъване на зъбите;
- Издръжливост на контактна умора (питинг);
- Износоустойчивост;
- Твърдост при високи температури;

- Якост на огъване и пластичност на огъване;
- Ударна жилавост и жилавост при разрушаване.

### 3. Анализ на химичния състав на използваните стомани.

След проучване на западните производители на редуктори се установи че някои от основните материали които се използват са стомани със следните означения: 20MnCr5, 31CrMoV9, 42CrMo4 и др. [7,8,13]

За да се отговори на въпроса: "По-добри ли са материалите за зъбни колела на западни фирми производители?", е необходимо да се направи сравнителен анализ на химичния състав, видовете термообработки на които се подлагат, до каква твърдост достигат и какви механични показатели се постигат.

В анализа ще се разгледа и един от най-новите материали които се прилагат за изработване на зъбни колела – стомани закалени на въздух Ovatec<sup>TM</sup>277 и 677 (самозакаляващи се, мартензитни стомани) [14,15].

За целта се приема да се сравни химичния състав на следните марки стомани: 40X, 18XГТ, 20MnCr5, 31CrMoV9, 42CrMo4 (Таблица 1). [6,9,10,11]

Наличието на легиращи елементи подобрява характеристиките на материалите по следния начин:

- Cr (Х-хром) – подобрява механичните качества, износоустойчивостта, киселиноустойчивостта и температуроустойчивостта на стоманата.

- Mo (М -молибден) - повишава якостните свойства при високи температури. При добавянето му се създават условия за равномерна и дребнозърнеста структурата на материала. Добавката му към хромникеловите стомани дава устойчивост към хлориди.

- Mn (Г-манган) - при повече от 1 % повишава якостните свойства на стоманата. До 10-15 % в аустенитните стомани подобрява ударната жилавост и износоустойчивост .

**Таблица 1. Химичен състав на стоманите.**

| № | Означение                | Стандарт | Еквивалент          | C         | Si        | Mn      | P         | S         | Cr      | Mo        | V       |
|---|--------------------------|----------|---------------------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|---------|-----------|---------|
| 1 | 40X                      | ГОСТ     | DIN 37Cr4/41 Cr4    | 0,36-0,44 | 0,17-0,37 | 0,5-0,8 | max 0,035 | max 0,035 | 0,8-1,1 | -         | -       |
| 2 | 18XГТ                    | ГОСТ     | DIN 20MnCr5         | 0,17-0,22 | 0,17-0,37 | max 0,3 | max 0,035 | max 0,035 | 1-1,3   | -         | -       |
| 3 | 20MnCr5                  | EN10084  | ГОСТ 18XГТ          | 0,17-0,22 | max 0,4   | 1,1-1,4 | max 0,025 | max 0,035 | 1-1,3   | -         | -       |
| 4 | 31CrMoV9                 | EN10085  | ГОСТ 30H3МФ         | 0,27-0,34 | max 0,4   | 0,4-0,7 | max 0,025 | max 0,035 | 2,3-2,7 | 0,15-0,25 | 0,1-0,2 |
| 5 | 42CrMo4                  | EN10083  | ГОСТ 40HГМ          | 0,38-0,45 | max 0,4   | 0,6-0,9 | max 0,025 | max 0,035 | 0,9-1,2 | 0,15-0,3  |         |
| 6 | Ovatec <sup>TM</sup> 277 |          | EN16CrMnNi Mo9-5-2F | 0,155     | 0,15      | 1,3     | 0,02      | 0,015     | 2,2     | 0,5       | 0,2     |

При сравнението се разглеждат и характеристиките на новата стомана Ovatec<sup>TM</sup>277 (OVAKO), която се произвежда по иновационна металургична технология и се използва широко от европейските фирми. Стомана Ovatec<sup>TM</sup>277 се използва за отговорни предавки (зъбни колела за вятърни турбини). [14,15].

**Извод:** При сравняването на химичния състав се отчита че някои използвани стомани по EN,DIN и ГОСТ си съответстват напълно(18XГТ и 20MnCr5), а при другите се забелязва използването на идентични легиращи елементи (хром, манган, молибден и др.), като има минимална разлика в процентното съдържание. Особено внимание може да се обърне на стоманата Ovatec<sup>TM</sup> 277, която е самозакаляваща се (мартензитна) стомана, и се използва за приложения с високи изисквания и е предназначена за повърхностно (чрез ХТО) уякчаване. Тя се закалява и отвърща лесно благодарение на състава си и може да замени голяма част от стоманите за различни инженерни приложения, благодарение на металургичната си чистота.

#### 4. Анализ на механичните характеристики на стоманите.

Химичният състав на стоманите определя техните механични показатели и вида на термообработките които се използват. Важни показатели за механичната якост са: граница на провлачване ( $R_e$ , МПа), якост на опън ( $R_m$ , МПа), относително удължение ( $A$ , %). [3,6,9,10,11].

В таблица 2 са посочени параметрите, по които е извършено сравнението.

**Таблица 2. Механични характеристики на стомани.**

| № | Означение                | $R_e$ -МПа | $R_m$ -МПа | $A$ , % | Ударна жилавост, J/cm | HB  |
|---|--------------------------|------------|------------|---------|-----------------------|-----|
| 1 | 40X                      | 784        | 980        | 10      | 59                    | 217 |
| 2 | 18XГТ                    | 833        | 980        | 9       | 79                    | 240 |
| 3 | 20MnCr5                  | 690        | min800     | 9       | min20                 | 217 |
| 4 | 31CrMoV9                 | 800        | 1000-1200  | 10      | 25-40                 | 248 |
| 5 | 42CrMo4                  | 650        | 800-1100   | 12-13   | 63                    | 241 |
| 6 | Ovatec <sup>TM</sup> 277 | 850        | 1200       | 15      |                       | 190 |

**Извод:** От данните в Таблица 2 се установява че няма големи разлики в механичната якост на използваните материали. Техните механични показатели се доближават и не може да се каже че определени марки са много по-добри или препоръчителни за изработване на зъбни колела.

#### 5. Анализ на термообработките на стоманите

Представят се само особеностите на технологиите за термообработка за постигане на най-добри показатели, определящи работоспособността, контактната якост и якостта на огъване на материалите. Термообработката (брой, вид и продължителност) определя до 30% от себестойността на изработените зъбни колела. Поради това е много важно да се анализират разликите в технологиите, използваното оборудване и особеностите на процесите при термообработване на различните марки стомани. [3,4,5,13].

##### ➤ **40X**

- закаляване,  $t=840-860^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – вода или масло
- отпускане,  $t=550-650^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – вода, масло, въздух, , твърдост HRC 52-62
- нормализация,  $t=850-870^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – въздух
- отпускане,  $t=560-650^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – въздух

##### ➤ **18XГТ**

- нормализация,  $t=800-950^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – масло
- закаляване,  $t=855-885^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – масло
- отпускане,  $t=150-250^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – въздух или вода
- цементация,  $t=920-950^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – въздух, твърдост HRC 55-63
- закаляване,  $t=820-860^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – масло
- отпускане,  $t=180-200^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – въздух
- подобряване -  $t=910^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – масло
- отпускане,  $t=570^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – въздух

##### ➤ **20MnCr5**

- нормализация,  $t=840-870^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – въздух
- закаляване,  $t=860-900^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – масло
- повърхностно закаляване - ,  $t=780-820^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – масло, твърдост HRC 60
- отпускане,  $t=150-200^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – въздух

##### ➤ **31CrMoV9**

- отгряване,  $t=680-720^{\circ}\text{C}$ ,
- закаляване,  $t=870-930^{\circ}\text{C}$ , охлаждане – масло или вода
- високо температурно отпускане,  $t=580-700^{\circ}\text{C}$ ,

азотиране - t-480-570°C, твърдост HRC 64

➤ **42CrMo4**

- нормализация, t-850-880°C, охлаждане – въздух
- закаляване, t-820-860°C, охлаждане – масло, твърдост HRC 53-61
- високо температурно отпускане, t-540-680°C, охлаждане – въздух

➤ **Ovatec™277**

- особеност на термообработката на тази марка стомана е, че се прокалява цялостно и придобива чисто мартензитна структура при охлаждане във въздушна среда.

При използване на въздушно или газово закаляване (последният метод е за предпочитане) се намаляват деформациите вследствие на закаляването в сравнение с традиционните повърхностно уячени стомани. Това позволява да се спестят средства от технологичните операции за отстраняване на деформациите при закаляване. Избягва се използването на закаляващи среди като масла и соли и така се подобрява безопасността и намалява замърсяването на околната среда. Времето за навъглеродяване може да се съкрати в сравнение с това за традиционните повърхностно цементираны стомани, тъй като стоманата Ovatec™277 има увеличено съдържание на въглерод в базовия материал.

**Извод:** След сравняване на режимите на термообработка може да се отбележат следните важни особености:

- работните температури при режимите на нагряване при различните марки стомани се припокриват и няма такива със стойности изискващи специални пещи;
- твърдостта на работните повърхнини на зъбите на зъбните козла варира в диапазон от HRC 52-64. Високата твърдост е основен фактор за по-голяма работоспособност и контактна якост на зъбите и по-малко износване;
- стоманата 18XГТ се отличава с много добри механични показатели и твърдост HRC 55-63, но технологията на термообработка изисква няколко цикъла до завършване на готовия детайл (нормализация, цементация, закаляване, отпускане). Това определя по голям цикъл от време за термообработване и съответно по-голяма енергоемкост на процеса;
- голямо значение има вида на термообработката. Повърхностно уячените зъбни козла издържат по-високи натоварвания от обемно уячените, въпреки че последните са поевтини поради по-лесната им термообработка. Всъщност основните недостатъци на повърхностното навъглеродяване (цементацията) като метод на уячаване са *деформациите на детайла и себестойността*. Деформациите се контролират, доколкото е възможно, по време на термообработката (чрез използване на матрици и щифтове) и накрая се коригират чрез фино шлифоване. По-високата себестойност на продукта е оправдана от гледна точка на получаването на високо съотношение "мощност- тегло" и висока трайност;
- внимание трябва да се обърне на посочените предимства на стоманата Ovatec™277.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Извършеният анализ очертава следните насоки по които трябва да се работи при производството на зъбни козла от български машиностроителни фирми:

- да се използват традиционните материали (руско и украинско производство) които напълно съответстват по механични показатели на повечето от използваните стомани от западни фирми, поради наличието на техническо оборудване за термична обработка, като за целта се променят технологиите и част от техниката (чрез модернизация) за да се намали енергоемкостта на термообработките и механичната обработка. Необходимо е създаване на добра организация за

производството с цел намаляване машинното и спомагателното време на обработка;

-да се усвои приложението на новите материали, което обаче е свързано с големи първоначални инвестиции за закупуване на съвременни машини, инсталации за термообработка и технологии;

-след направено изследване на стойността на материала на изследваните стомани от фирма, дистрибутор на стомани в гр.Русе, се установи че цените на традиционните стомани и новите които се използват се припокриват (1,6-2лв./кг), като само цената на 31CrMoV9 е около 3-4лв./кг.[12]. Данни за цената на стоманата Ovatec<sup>TM</sup>277 не са намерени поради факта че все още не е внасяна в България.

При съществуващото икономическо положение в страната и състоянието на машиностроителните фирми, за една българска фирма, традиционен производител на редуктори и зъбни колела, икономически по-изгоден вариант би бил да се избере производство по първия вариант. Добро решение е за основен материал за зъбни колела да се използва стомана 18ХГТ, поради доказаните си качества и усвоени технологии на механична обработка и термообработка. Необходимо е да се инвестират средства в модернизация на машините и инсталациите за да се намалят производствените разходи и продукцията да бъде конкурентноспособна на пазара.

### ЛИТЕРАТУРА

[1] Ангелова, Е., В. Върбанов, В. Ронкова, Якостно изчисляване на еволвентни цилиндрични зъбни предавки, съпоставяне на стандартите ГОСТ, БДС и ISO, Научни трудове на Русенския университет, Том 51, серия 4, Издателски център при Русенски университет, Русе, 2012, стр. 192-197, ISSN 1311-3321

[2] Ангелова, Е., В. Ронкова, Препоръки за основните проектни параметри на фамилии разгнати двустъпални цилиндрични редуктори, Национална конференция по машиностроене и машинознание, сп. Машиностроене и Машинознание 13, Година VI, Книга 1, 2011, Издателство на ТУ-Варна, с. 52-57, ISSN 1312-8612.

[3] Зубченко А.С. Марочник-Сталей и сплавов, Машиностроение-1, Москва, 2003.

[4] Лахтин Ю.М. Термическая обработка в машиностроении, Машиностроение, Москва, 1980.

[5] Филипов С.А. Справочник термиста, Машиностроение, Москва, 1975.

[6] Wengst C.W, Key to steel, 1992г., ISBN3-922599-09-5.

[7] <http://modul-biala.com/>

[8] <http://www.varvel.com/products/>

[9] <http://www.steelnumber.com/>

[10] <http://www.splav.kharkov.com/en/index.php>

[11] <http://www.evek.bg/reference/ref-obshie-analogi-staley.html>

[12] <http://www.pik2003.com/>

[13] <http://www.techint-bg.com/>

[14] [http://www.ovako.com/Global/Downloads/Product\\_information/Ovako\\_Group/EN/Q%20steel.pdf](http://www.ovako.com/Global/Downloads/Product_information/Ovako_Group/EN/Q%20steel.pdf)

[15] Разработване на зъбни предавки на базата на нови материали и нови системи зъбни колела (COLL-CT-2006 договор 030433).

### За контакти:

Инж. Юлиян Димитров, Катедра "Машинознание, машинни елементи и инженерна графика", Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: 082-888 461, e-mail: ydimitrov@uni-ruse.bg

Доц. д-р. Васко Добрев, Катедра "Машинознание, машинни елементи и инженерна графика", Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: 082-888 492, e-mail: vdobrev@uni-ruse.bg

**Докладът е рецензиран.**

