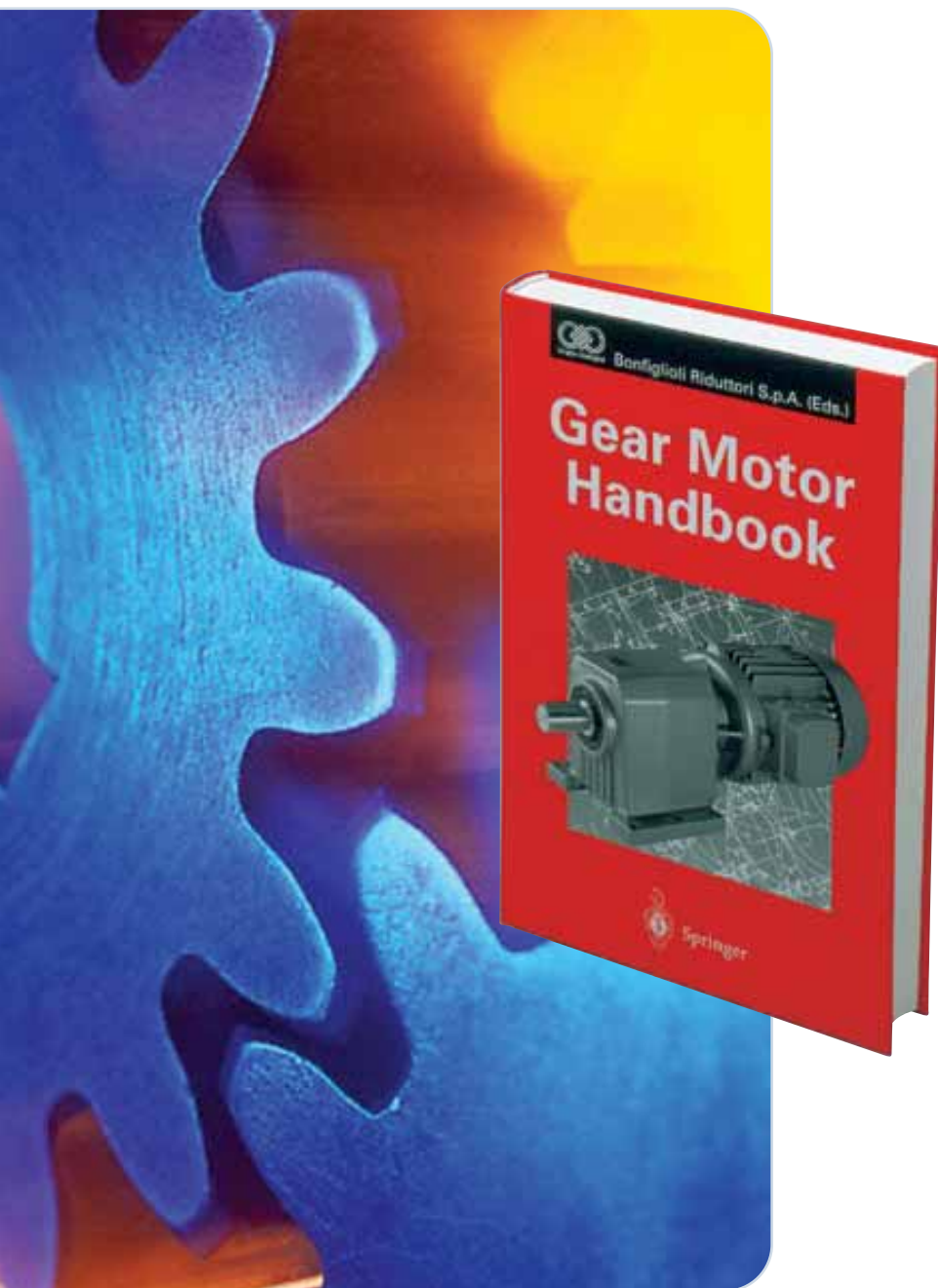


Continua la pubblicazione integrale di parti del "GEAR MOTOR HANDBOOK"

PARTE II° DINAMICA DEI SOLIDI E RESISTENZA DEI MATERIALI

Jacques Sprengers Presidente ISO/TC 60



l'organo sollecitato. Nel caso di un unico carico si applica la regola espressa nell'equazione (1.010). La regola di Palmgren-Miner presuppone che ciascun carico per la parte della sua durata che non supera N_D agisca proporzionalmente alla sua durata; ed inoltre che se per ogni sollecitazione sia risultante dall'applicazione di un carico elementare dello spettro (o per ogni coppia T_i che forma o spettro) la durata dell'applicazione è ΔN_i mentre la corrispondente durata sulla curva $\sigma - N$ è N_i la stabilità è assicurata se:

$$(1.011) \quad \sum \frac{\Delta N_i}{N_i} \leq 1$$

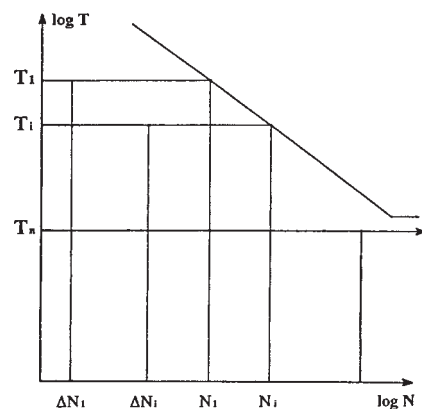


Fig. 1.6. Regola di Miner

Carico Equivalente. L'equazione (1.009) può essere applicata ad un dato spettro di carico; per N_2 è possibile scegliere un qualsiasi valore, il quale sarà espresso da N_{equ} a cui corrisponde la coppia equivalente T_{equ} .

Per ogni livello dello spettro, si avrà:

$$(1.012) \quad \frac{T_i}{T_{equ}} = \left(\frac{N_{equ}}{N_i} \right)^{\frac{r}{p}}$$

Applicando l'equazione (1.011) con N_i risultante da questa relazione si ottiene:

$$(1.013) \quad \sum \frac{\Delta N_i}{N_i} = \left[\sum \Delta N_i T_i^{\frac{p}{r}} \right] \frac{1}{N_{equ} T_{equ}^{\frac{p}{r}}} = 1$$

E quindi

$$(1.014) \quad T_{equ} = \left[\sum \frac{\Delta N_i}{N_{equ}} T_i^{\frac{p}{r}} \right]^{\frac{r}{p}}$$

Questo carico equivalente è in relazione al numero equivalente di cicli di carico scelto arbitrariamente. Esso costituisce un unico carico che sostituisce lo spettro a condizione che si prenda in considerazione il numero dei cicli associati allo spettro stesso.

1.4 Materiali

1.4.1 Caratteristiche Generali

I materiali utilizzati per la costruzione dei riduttori a ingranaggi sono generalmente metallici, a parte i polimeri impiegati nei giunti, negli elementi elastici di trasmissione e negli organi di tenuta. I principali materiali metallici sono quelli ferrosi ed il bronzo.

1.4.2 Materiali Ferrosi

I materiali ferrosi sono costituiti da leghe di ferro e carbonio. In relazione al tenore di carbonio si distinguono gli acciai (con un tenore di carbonio inferiore al 1,2%) e le ghise (con un tenore di carbonio superiore al 2,5%).

Acciaio al carbonio. L'acciaio è costituito da cristalli di ferrite e cementite chiamato perlite. La ferrite è ferro mentre la cementite è carburo di ferro. Gli acciai hanno proprietà variabili che variano a seconda del tenore di carbonio. La resistenza a trazione e la durezza aumentano proporzionalmente al tenore di carbonio, mentre la resistenza agli urti ed all'allungamento sono inversamente proporzionali a tale tenore.

Acciai Legati. Gli acciai legati sono acciai al carbonio ai quali sono stati aggiunti dei metalli quali manganese (Mn), cromo (Cr), nickel (Ni) e molibdeno (Mo) per migliorarne le proprietà chimiche e meccaniche. I prodotti risultanti da tali aggiunte sono noti con il nome di acciai speciali. L'acciaio inossidabile, ad esempio, è il risultato dell'aggiunta di Cr e Ni (18% e 8%). Anche piccole aggiunte degli elementi sopraindicati possono modificare sensibilmente le proprietà di acciai aventi lo stesso tenore di carbonio.

Ghisa. Le ghise presentano proprietà differenti in relazione alla velocità di raffreddamento dopo fusione. Se il raffreddamento è rapido, la ghisa è composta da ferrite e cementite (un carburo di ferro); il prodotto risultante è la ghisa bianca, molto dura, estremamente fragile e in pratica non lavorabile. Con un raffreddamento lento si ottiene una ghisa priva di cementite libera che risulta composta da una matrice metallica simile a quella di un acciaio duro (alto tenore di carbonio) contenente grafite libera lamellare risultante dalla decomposizione della cementite. Il prodotto avente tali caratteristiche e risultante da questo raffreddamento lento è noto con il nome di ghisa grigia lamellare, la quale ha buone proprietà

Full publication continues of our "GEAR MOTOR HANDBOOK" Part II: Dynamics of solids and strength of materials

action. In the case of a single load, the rule expressed in equation (1.010) is applied. The rule of Palmgren-Miner assumes that, for the lapse of time not greater than N_D , each load acts proportionally to its duration. If for each stress s_i resulting from the application of an elementary load of the spectrum (or for each torque T_i that forms the spectrum) the duration of the application is ΔN_i and the corresponding duration on S - N curve is N_i , stability will be assured if:

$$(1.011) \quad \sum \frac{\Delta N_i}{N_i} \leq 1$$

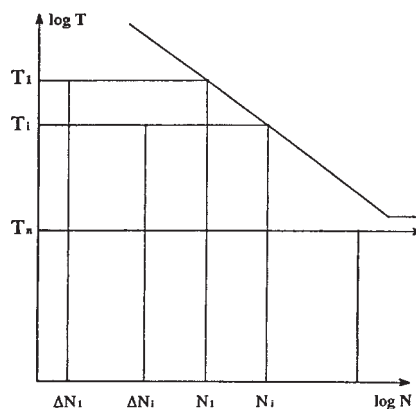


Fig. 1.6. Miner's rule

Equivalent load. Equation (1.006) can be applied to a given load spectrum, any value can be chosen for N_2 . It will be expressed by N_{equ} to which the equivalent torque corresponds T_{equ} .

For each level of the spectrum:

$$(1.012) \quad \frac{T_i}{T_{equ}} = \left(\frac{N_{equ}}{N_i} \right)^{\frac{r}{p}}$$

Applying equation (1.011) with N_i resulting from this relation:

$$(1.013) \quad \sum \frac{\Delta N_i}{N_i} = \left[\sum \Delta N_i T_i^{\frac{p}{r}} \right] \frac{1}{N_{equ} T_{equ}^{\frac{p}{r}}} = 1$$

and

$$(1.014) \quad T_{equ} = \left[\sum \frac{\Delta N_i T_i^{\frac{p}{r}}}{N_{equ}} \right]^{\frac{r}{p}}$$

The equivalent load is related to equivalent number of load cycles chosen arbitrarily. It forms a single load replacing the spectrum on condition that the number of cycles associated with the spectrum is taken into consideration.

1.4 Materials

1.4.1 General Features

The materials used in the production of gear-boxes are generally metal materials used in the production of transmission devices. The main metal materials are ferrous materials and bronze.

1.4.2 Ferrous Materials

Ferrous materials are made of iron and carbon alloys. The percentage of carbon affects the production: indeed it may be steel (containing less than 1.2% carbon) or cast-iron (containing more than 2.5% carbon).

Carbon Steel. Steel is made of ferrite crystals and of an amalgam of small crystals of ferrite and cementite called pearlite. Ferrite is iron ore while cementite is an iron carbide. Steels show different properties that vary according to their carbon content.

Resistance to traction and hardness increase proportionally to the carbon content, while resistance to shocks and the following elongations are inversely proportional to the inner quantity of carbon in the steel (resistance will diminish if the percentage of carbon increase).

Special Steels. Often fusion the cooling rate effects ordinary steels are enriched with metals or various substances such as Manganese (Mn), Chrome (Cr), Nickel (Ni) and Molybden (Mo) in order to improve their chemical and mechanical properties. The products resulting from such addition are known as special steels. The important addition of Cr and Ni (18% and 8%), for example, results in stainless steel. Even a smaller quantity of the a.m. substances adds to a general increase in the mechanical properties of steel. Such improvement does not affect ordinary steels free from this addition



meccaniche, simili a quelle degli acciai duri. Queste proprietà, tuttavia, sono ridotte a causa degli inneschi a rottura dovuti alla presenza della grafite lamellare. Per effetto del calore e con l'aggiunta di determinati elementi, le lamelle di grafite hanno la tendenza a formare piccole sfere dando luogo alla ghisa grigia sferoidale. La ghisa sferoidale ha proprietà meccaniche migliori rispetto alla ghisa grigia, anche se la produzione è molto più costosa.

Trattamento Termico dell'Acciaio. La temperatura influisce sulla struttura degli acciai e sulle relative proprietà. L'azione prodotta dalla temperatura è chiamata trattamento termico.

- Ricottura. Oltre i 910°C il ferro si trasforma in un'altra varietà cristallografica in grado di sciogliere il carbonio (al di sotto di tale temperatura il carbonio non può sciogliersi). Questa temperatura di trasformazione diminuisce all'aumentare del tenore di carbonio fino a circa 720°C per una lega con lo 0,8% circa di carbonio. Quando l'acciaio è riscaldato al di sopra del punto di trasformazione, la struttura cristallina si trasforma in cristalli omogenei di una soluzione di carbonio nel ferro γ (austenite). Tutte le strutture indesiderabili che possono essere presenti a temperatura ambiente nell'acciaio risultanti dall'effetto prodotto da una deformazione o da una difettosa cristallizzazione durante il raffreddamento tendono a scomparire tanto più rapidamente quanto più è elevata la temperatura. Allo stesso tempo aumentano le dimensioni dei grani di austenite. Se il raffreddamento è lento, l'austenite si trasforma nuovamente in ferrite e perlite, le tracce delle strutture precedenti scompaiono e il grano cristallino è fortemente ingrossato. Questo trattamento termico prende il nome di ricottura di omogenizzazione per diffusione.

Se una struttura caratterizzata da grani grossi viene sottoposta nuovamente a riscaldamento al di sopra del punto di trasformazione, si formano ancora dei piccoli grani di austenite e la struttura di ferrite-perlite che risulta da un raffreddamento in aria presenterà una grana molto fine che migliora le proprietà meccaniche. Quest'ultimo trattamento prende il nome di normalizzazione.

- Tempra. Quando l'acciaio viene riscaldato ad una temperatura superiore all'intervallo critico per ottenere austenite e quindi rapidamente raffreddato in acqua o olio, subisce una trasformazione cristallografica ma la velocità di raffredda-

mento impedisce la formazione di ferrite e perlite. Ne risulta una struttura omogenea e molto fine chiamata martensite, molto dura, resistente a trazione. Questo tipo di trattamento prende il nome di tempra e risulta facilitato dal tenore di carbonio. Gli acciai con alto tenore di carbonio (da 0,4% a 1,0%) presentano un alto grado di temprabilità, mentre quelli poveri di carbonio non possono essere temprati. La tempra è facilitata anche dall'aggiunta di alcuni metalli (Cr, Ni, Mn).

Gli acciai contenenti una percentuale di carbonio compresa tra 0,35% e 0,42% con aggiunte, ad esempio, di Cr e Ni (da 1% a 1,5%) possono essere temprati senza difficoltà e con risultati soddisfacenti. Vengono chiamati acciai da tempra, e sono utilizzati nella produzione di alberi ed ingranaggi. La temprabilità è definita dalla prova Jomony, la quale consiste nel riscaldare una provetta fino alla temperatura di tempra e poi raffreddare rapidamente una delle sue estremità. La durezza finale della barretta varia a seconda della distanza J dall'estremità temprata. Alcune formule empiriche consentono di prevedere la durezza alla distanza J in funzione della composizione dell'acciaio. Queste formule, anche se approssimate, evidenziano l'influenza degli elementi aggiunti. Per esempio secondo Just, negli acciai contenenti una percentuale di carbonio inferiore a 0,25% si avrà:

$$HRC_J = 74\sqrt{C} + 14Cr + 5,4Ni + 29Mo + 16Mn - 16,8\sqrt{J} + 1,386J + 7 \quad (1.015)$$

Mentre negli acciai contenenti una percentuale di carbonio superiore a 0,25% (fino a 0,60%):

$$HRC_J = 102\sqrt{C} + 22Cr + 21Mn + 7Ni + 33Mo - 15,47\sqrt{J} + 1,102J - 16 \quad (1.016)$$

I simboli chimici rappresentano la percentuale dei vari elementi. Per un acciaio contenente 0,18% di C, 1,5% di Ni, 1,5% di Cr e 0,2% di Mo, con una distanza Jominy = 12 il valore riscontrato sarà: $HRC_{12} = 31,7$.

Lo stesso acciaio senza Cr, Ni e Mo avrà una durezza calcolata "negativa" mostrando la sua non temprabilità.

La tempra può essere eseguita in acqua o olio a temperatura ambiente (spegnimento in acqua o in olio) oppure in bagni di sali ad una opportuna temperatura più elevata. In quest'ultimo caso la struttura risultante si chiama balinite ed è molto diversa dalla martensite. La balinite è una struttura

which have a similar carbon content.

Cast-iron. After fusion the cooling rate effects materials, in particular cast iron and its features. If cooling is fast, it means that the cast iron is made of ferrite and cementite (an iron carbide); the resulting product is white cast-iron, which is very hard, very fragile and not easily malleable. Though slow cooling this cast iron can be obtained without free cementite. Such iron is made of a metallic matrix which is similar to that of hard steel (high carbon content) containing flakes of free graphite resulting from cementite decomposition. The product showing such features and resulting from this slow cooling is known as grey cast iron. Grey cast iron has good mechanical properties, which are similar to those of hard steels. However, such properties are not as good as those of hard steels because grey cast iron can break. Such risk is due to the presence of graphite flakes.

If graphite flakes are melted, under the action of addition, they change into small bodies (globules) from which originates SG iron. The mechanical properties of SG iron are better than those showed by grey cast-iron, but SG iron production is much more expensive.

Thermic Treatment of Steel. Temperature affects the structure of steels and their properties. Such an effect is known as thermic treatment.

- **Annealing.** Above 900°C iron transforms into another crystallographic variety which can dissolve carbon (below such temperature carbon cannot be dissolved). In an alloy containing 0.9% of carbon, the a.m. temperature will diminish to 720°C if the content of carbon increase. When steel is subject to a higher temperature, the crystalline structure turns into small crystals of an homogeneous solution of carbon mixed with iron, from which austenite originates. In the presence of increasing temperatures, all the unwanted particles existing in steel at ambient temperature tend to disappear. Such unwanted particles result from distortions caused by different stresses or by a faulty crystallization during cooling. At the same time the dimension of austenite grains increase. If cooling is slow, the transformation of austenite into ferrite and pearlite takes place again and traces of past structures

disappear. The dimensions of grains again increase. Such thermic treatment is called homogenizing diffusion annealing. If a structure characterized by large grains undergoes such treatment again a temperature above the transformation range, grains of austenite will be formed again and the structure ferrite-pearlite resulting from a slower cooling will show fine grains which are known to develop the good mechanical properties. This latest treatment is known as normalizing annealing.

- **Hardening.** As stated before, iron is heated above the transformation temperature in order to obtain austenite which is immediately water or oil cooled. During this process iron undergoes the a.m. crystallographic transformation, even when the cooling rate prevents ferrite and pearlite from separating. The resulting structure is called martensite, which is very hard and very resistant to traction. This kind of treatment goes under the name of hardening (or quenching) and it is made easier by the carbon content. Steels with a high carbon content (from 0.4% to 1.0%) show a high degree of hardenability, while steel poor in carbon cannot be hardened. The addition of metal (Cr, Ni, Mn) as well as that of carbon helps hardening.

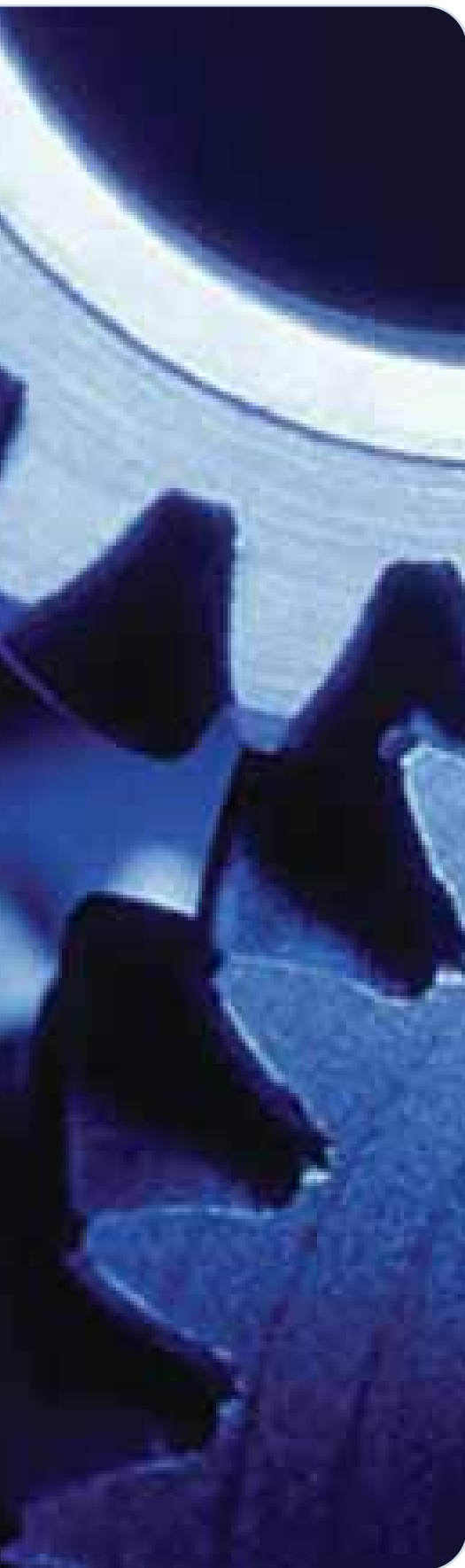
Steels containing a carbon percentage that goes from 0.35% to 0.42% with addition like Cr (from 1% to 1.5%) and Ni can be hardened without difficulty and the results are satisfactory. Steel that give such satisfactory results are called hardening steel. These steels are used in the production of shafts and gears. The hardening capacity is defined by the Jominy test, which consists of heating a bar of the tested material which is then cooled by means of water or oil. The final hardness varies depending on the basis of the J distance from the hardened extremity. Some empirical formulae enable one to make provision about the degree of hardness at the J distance on the basis of steel compounds. These formulae are approximate but they demonstrate the effect of any additions. According to Just, for steels containing a percentage of carbon lower than 0.25% we find that:

$$HRC_J = 74\sqrt{C} + 14Cr + 5.4Ni + 29Mo + 16Mn - 16.8\sqrt{J} + 1.386J + 7$$

(1.015)

While for steels containing a percentage of





con elevate durezza e resilienza. Questo tipo di trattamento viene definito tempra isotermica (permanenza in bagno a temperatura costante fino a completa trasformazione della struttura) o tempra scalare (permanenza in bagno a temperatura costante per il tempo necessario al raggiungimento dell'equilibrio termico).

- Tempra superficiale (tempra ad induzione o alla fiamma). Gli acciai più duri, che sono anche i più fragili rispetto agli urti, sono quelli che presentano il massimo grado di temprabilità. Se si desidera un alto grado di durezza superficiale ed elevata resilienza nel cuore del materiale, si ricorre alla tempra superficiale su acciai temprabili. La tempra superficiale consiste nel riscaldare la parte esterna del pezzo da trattare per un certo spessore e successivamente far seguire un brusco raffreddamento. La parte esterna risulta temprata mentre quella interna, il cuore, mantiene le caratteristiche che aveva prima del trattamento (e quindi una buona resilienza). La parte esterna del pezzo può essere riscaldata utilizzando due diversi metodi: mediante un cannello, che provoca un rapido aumento della temperatura nello strato esterno e raffreddando rapidamente la parte esterna in acqua o olio prima che per conducibilità termica si riscaldi il cuore, oppure avvolgendo un solenoide attraversato da una corrente ad alta frequenza intorno al pezzo. L'induzione, per effetto del campo elettrico, crea un passaggio di corrente indotta ad alta frequenza sulla superficie del pezzo. Tale corrente non penetra all'interno del pezzo (effetto pelle) e per effetto Joule provoca riscaldamento dello strato esterno. È sufficiente raffreddare con acqua o olio immediatamente dopo il riscaldamento per ottenere la tempra nella parte esterna. Gli acciai da tempra superficiale hanno composizione analoga a quella degli acciai impiegati per la tempra totale. Tali trattamenti vengono utilizzati nella produzione degli ingranaggi.

- Cementazione carburante. Gli acciai temprati superficialmente hanno un basso grado di resilienza dato che la tempra superficiale viene eseguita su acciai duri e dunque non molto resilienti nel cuore.

Per ottenere un alto grado di resilienza e durezza è necessario scegliere un acciaio dolce non temprabile e ottenere all'esterno un acciaio duro facilmente temprabile. Per ottenere ciò si aumenta il tenore di carbonio di un acciaio dolce al carbonio o legato lasciandolo in un'atmosfera ricca

di carbonio ad una temperatura superiore al punto critico (1000°C). Sulla superficie l'austenite scioglie il carbonio che si diffonde lentamente all'interno. Quando la quantità di carbonio penetrata è sufficiente (fare attenzione ad evitare eccessi di carbonio nell'area periferica) l'operazione va interrotta. Dopo questo trattamento, che dura diverse ore, si estrae il pezzo dal forno sottoponendo poi a trattamento in acqua o olio. Lo strato arricchito di carbonio (strato cementato) si temprata mentre il cuore mantiene le caratteristiche iniziali. Il risultato è una elevata durezza superficiale fino ad una certa profondità ed una elevata resilienza globale. Gli acciai selezionati per questo trattamento sono poveri di carbonio (da 0,15% a 0,20% legati sia al Cr-Ni sia al Cr-Mn (da 1,5% a 2%). Tali acciai prendono il nome di acciai da cementazione. Dato che questo trattamento richiede una lunga fase di riscaldamento, possono prodursi delle deformazioni. Lo strato cementato crea una sollecitazione di compressione nella massa che ha effetti positivi in alcune applicazioni tecniche.

- Niturazione. Quando un acciaio viene riscaldato ad una temperatura di circa 500-530°C in un'atmosfera ricca di azoto, quest'ultimo forma con il ferro e con altri metalli in lega dei nitrucci estremamente duri. Questi ultimi si formano in superficie ai bordi dei grani e molto lentamente anche al centro. Lasciando un pezzo in dette condizioni per un tempo molto lungo (circa 100 ore) la penetrazione può raggiungere 1 millimetro circa. In questo modo il grado di durezza del metallo può aumentare notevolmente senza modificare l'originaria resistenza agli urti. Questo trattamento dà risultati analoghi a quelli della carburazione (carbocementazione). A differenza della carbocementazione lo spessore dello strato indurito è più piccolo, il trattamento dura più a lungo ed è quindi più costoso; il valore delle deformazioni è inferiore essendo la temperatura di trattamento più bassa.

Questo trattamento è riservato a pezzi da indurire superficialmente e per i quali una successiva lavorazione sarebbe impossibile o difficile a farsi. La niturazione può eseguirsi in un'atmosfera gassosa ricca di azoto nascente ottenuto, ad esempio, dalla decomposizione dell'ammoniaca, oppure può essere eseguita in un bagno di sali fusi (cianuri). In questo caso la niturazione è accompagnata dalla carburazione. Il trattamento risultante prende il nome di nitrocarburazione. Gli acciai utilizzati per la niturazione sono

carbon higher than 0.25% (to 0.60%):

$$HRC_J = 102\sqrt{C} + 22Cr + 21Mn + 7Ni + 33Mo - 15,47\sqrt{J} + 1,102J - 16$$

(1.016)

The chemical symbol represent the percentage of the different elements. For a steel containing 0.18% of C, 1.5% of Ni, 1.5% of Cr and 0.2% of Mo, with a Jominy distance=12 the value found is: HRC 12=31.7.

The same steel without Cr, Ni and Mo has a "negative" hardness calculation and will show it to have a low degree of hardenability. Hardening can be executed by means of water or oil at ambient temperature (water or oil quenching) or it can be performed in baths at a higher temperature. The resulting structure is called bainite which is quite different from martensite. Bainite is a very hard and extremely resilient material and results from martempering (using a bath at a constant temperature) or from austempering (following two baths at a decreasing temperature).

- Surface hardening (induction hardening or flame hardening). The hardest steels, which are also the most fragile with regard to shocks, are those showing the highest degree of hardenability.

If a high degree of hardness and resilience is required, it is sufficient to harden the surface of steels. The surface hardening consists of heating the exterior part of a piece of steel down to a fixed depth and in hardening the hot surface. The exterior part gets harder while the inner part, the core, remains unchanged (it shows the same degree of resilience). The exterior section can be heated following two different methods: a pipe may be used that result in an immediate rise in the temperature of the exterior surface on which oil or water may be poured in order to make the cooling faster to prevent the core from heating. It is also possible to wind a solenoid round the piece, through which runs a flow of high frequency current. Induction, due to the electric field, creates a flow of high frequency induced current on the surface of the piece. As a consequence of Joule's effect and of the skin effect such a flow does not penetrate into the core that is created. To harden the exterior section, it should be bathed it with water or oil. Steels which are subject to shell hardening and those fully tempered are of the same type. These

processes are used in gear production.

- Carburizing. Surface-hardened steels have a low degree of resilience as surface-hardening is performed on hard steels which are not very resilient.

To obtain a high degree of resilience and hardness it is necessary to choose a mild steel which is not particularly hard; its peripheral area must be turned into hard steel which shows a good degree of hardenability. By leaving an ordinary or specially mild steel in an atmosphere rich in carbon at a temperature which is higher than that of the transformation point (1000°C), an increase in the carbon content occurs, starting from the peripheral area of the section. Austenite on the surface dissolves carbon that penetrates slowly inwards. When the quantity of carbon penetrated is satisfactory (attention should be to avoid any excess of carbon in the peripheral area) the operation can stop. After this treatment, that lasts several hours, the piece is taken out of the oven and subject to oil or water quenching. The layer enriched with carbon (case-hardened layer) is tempered while the core itself does not undergo any treatment. The material is now resilient and has a high degree of shell hardness that is deep. Steels chosen to undergo such treatment are poor in carbon (from 0.15% to 0.20%). Cr-Ni- or Cr-Mn are added in quantities from 1.5% to 2%. Such steel is known as case-hardening steels. As this treatment necessitates a long lasting heating, distortions may occur. The case-hardened layer creates compressive stress in the mass which has beneficial effects in some technical applications.

- Nitriding. When metal is heated at a temperature of about 700°C in an atmosphere which is rich in Nitrogen, Nitrogen forms together with iron into, extremely hard metal nitrides. Such nitrides penetrate slowly into the grains and moves toward the core. By leaving a piece of metal under the a.m. conditions for any length of time (about 100 hours) penetration can reach 1 millimetre. In this way the degree of metal hardness without modifying its original resistance to shocks can increase. This treatment gives the same results as carburizing (case-hardening). Different from case-hardening the thickness of the hardened layer is smaller and the duration of the treatment

