

Chapitre 4 Traitements thermiques

4.1.	La trempe (théorie)	126
4.1.	La trempe (pratique)	134
4.2.	Le revenu (théorie)	142
4.2.	Le revenu (pratique)	142
4.3.	Les traitements thermiques de l'acier rapide	144
4.3.1.	Trempe	144
4.3.2.	Revenu	144
4.3.3.	Nitruration	148
4.4.	Les recuits	147
4.4.1.	Recuit de normalisation	147
4.4.2.	Recuit doux	148
4.4.3.	Recuit de stabilisation ou recuit intermédiaire	148
4.5.	Les durcissements de surface	150
4.5.1.	Cémentation	150
4.5.1.1.	Cémentation solide	154
4.5.1.2.	Cémentation liquide	154
4.5.1.3.	Cémentation gazeuse	154
4.5.1.4.	Cémentation rapide	156
4.5.2.	Nitruration	158
4.6.	Essais de trempabilité « Jominy »	162

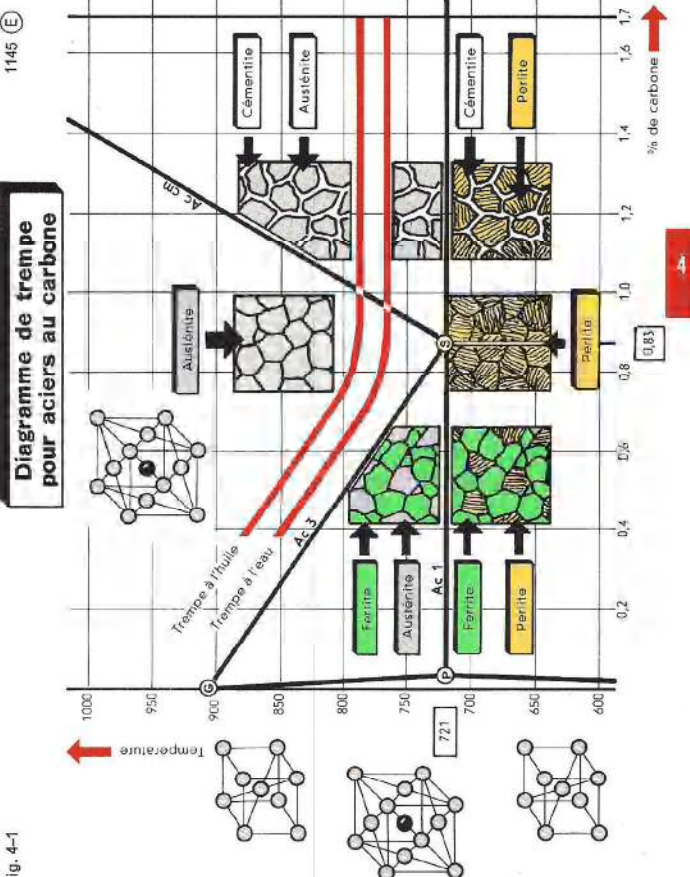


Fig. 4-1

Généralités

Les traitements thermiques des métaux et des alliages ont pour but de modifier les propriétés de ces corps, uniquement par variation de température.

Les catégories de traitements thermiques sont :

- la trempe
- le revenu
- les recuits

Remarque

La détermination des traitements thermiques à imposer à un métal est basée sur :

- le diagramme fer-carbone (fig. 4-1)
Observation des points critiques du métal
Les températures de chauffe
- Pour le déplacement de Ac1 - Ac3 - Accm des aciers alliés, voir page 170.
- la courbe TTT (fig. 4-3)
Etude du refroidissement
Les températures de refroidissement
- Pour le déplacement des courbes TTT des aciers alliés, voir page 170.

4. 1. La trempe (théorie)

Généralités

La trempe est une opération qui consiste à refroidir brusquement un produit métallurgique porté à une température bien définie, afin d'en modifier les propriétés.

Température de chauffe

Le diagramme fer-carbone avec la courbe de trempe nous indique les températures de chauffe des aciers

- eutectoïdes
- hypoeutectoïdes
- hypereutectoïdes

1. Température de chauffe pour les aciers eutectoïdes

L'élévation de la température produit une modification de la nature des constituants.

Structure d'un acier eutectoïde avant le chauffage.

Des grains de perlite Magnétique

Ferrite ou fer pur cristallisé selon la variété (alpha)
Cémentite ou carbure de fer. Molécules formées de 3 atomes de fer et 1 atome de carbone

Structure de chauffe après le point Ac1 + 50°.

Des grains d'austénite Amagnétique

Solution à l'état solide de carbone dans le fer gamma
Le carbone est mélangé au fer à l'intérieur même du cristal

2. Température de chauffe pour les aciers hypoeutectoïdes

Augmentation de la température vers la gauche, pour obtenir toute la structure austénitique. Ac3 + 50°.

Remarque

Pour une température inférieure à Ac3, la ferrite non transformée en austénite subsisterait après la trempe, d'où diminution de la dureté.

Important

Le minimum de carbone pour qu'un acier prenne une dureté suffisante à la trempe se trouve à 0,4% environ.

3. Température de chauffe pour les aciers hypereutectoïdes

Même température que pour les aciers eutectoïdes.

Remarque

La cémentite non transformée subsiste après la trempe, mais sa dureté étant plus grande que la martensite, l'influence sur la dureté sera bénéfique.

Explication schématique

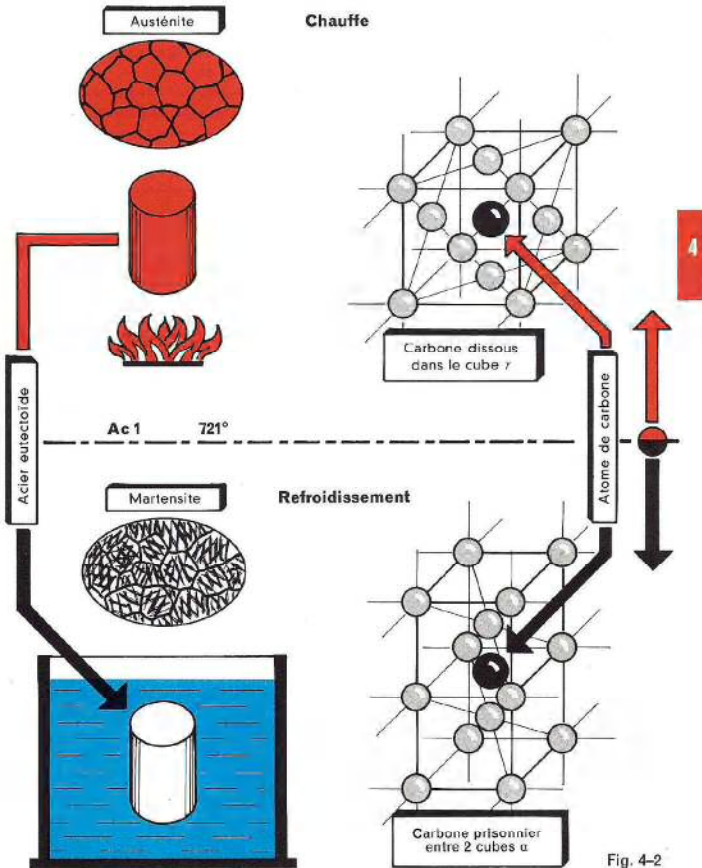


Fig. 4-2

Températures de refroidissements

Généralités
Les structures et la dureté obtenues avec le refroidissement sont fonction de la vitesse de refroidissement.

Diagramme TTT

(temps, température, transformation)
Le diagramme donne les structures ou les phases de transformation que subit l'austénite refroidie à des températures différentes, en dessous de 721°, en fonction du temps.
Pour observer les réactions, 5 éprouvettes d'acier eutectoïde sont chauffées à la température de tremp, 50° au-dessus de Ac1, puis refroidies à des températures différentes.

Essais	Température maintenue de refroidissement subite	Temps de l'austénite	Temps total nécessaire à la transformation de l'austénite	Structure obtenue Dureté
Phase perlitique. Le carbone se sépare du cristal gamma.				
N° 1	700°	240 sec.	3600 sec.	Perlite lamellaire HB 250 à 300
N° 2	650°	10 sec.	65 sec.	Perlite à fines lamelles. HB 300
N° 3	550°	moins de 1 sec.	3 sec.	Perlite à très fines lamelles. HB 400
Phase bainitique. Phase intermédiaire entre la perlite et la martensite.				
N° 4	300°	100 sec.	1000 sec.	Bainite Constituant assez mal connu. La dureté est fonction de la température de refroidissement
Phase martensitique. Structure de tremp (fig. 4-2). Martensite. HRC 65 à 68 environ. La structure est formée d'aiguilles entrecroisées. Magnétique. La transformation du cube gamma en cube alpha étant trop rapide, le carbone reste emprisonné dans le cristal alpha. La formation de la martensite se fait sans transition. La part de la martensite ainsi formée est uniquement fonction de la température de refroidissement.				
N° 5	180° 80° 20°			50% de martensite 90% de martensite 93% de martensite
Remarque: L'austénite restante se nomme austénite résiduelle.				

Diagramme TTT d'un acier eutectoïde

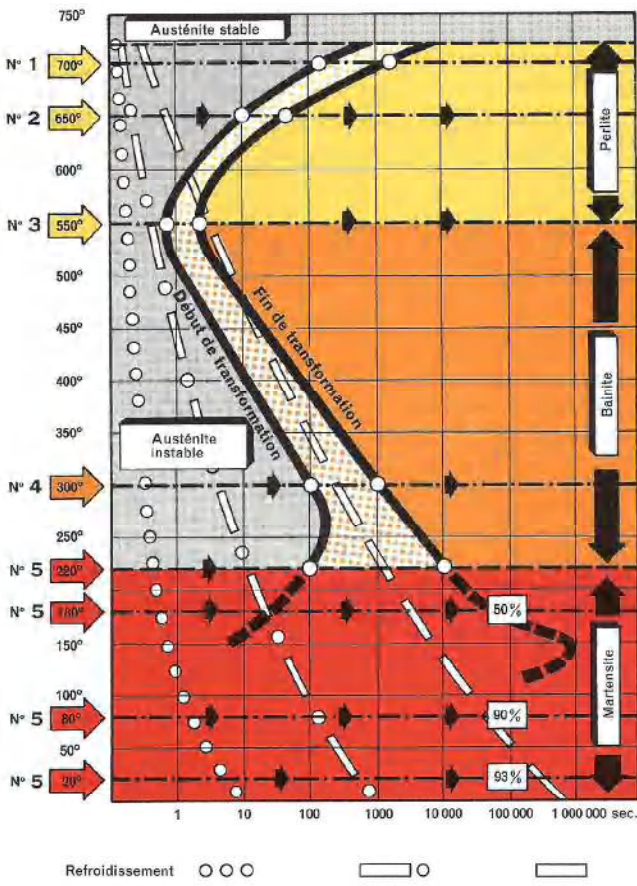


Fig. 4-3

Interprétation du diagramme TTT (tableau 4-4)

(A) Structures obtenues par le refroidissement

Superposons au diagramme TTT diverses courbes de refroidissement continu, eau, huile, air ou dans un four. On admet qu'aux points où la courbe de refroidissement continu rencontre la courbe en S, l'échantillon ou la pièce se trouve dans le même état que s'il avait été brusquement refroidi à la température où commence la transformation, perlite ou bainite.

Remarque

La vitesse critique de tremp correspond à la courbe de refroidissement tangente à la courbe en S dans sa partie supérieure.

(B) Trempe étagée martensitique

La tremp est effectuée dans un bain chaud, d'une température aussi voisine de Ms, et maintenue un certain temps pour être suivie d'un refroidissement à l'air.

Remarque

Le bain de tremp doit être capable d'absorber la chaleur assez rapidement.

(C) Trempe étagée bainitique

La pièce est maintenue un certain temps dans un bain chaud d'une température comprise entre Ms et 450° puis refroidie à l'air.

Remarque

La tremp bainitique donne aux pièces une dureté de 42 à 55 HRC, mais améliore les qualités de résistance et d'allongement.

(D) Choix du milieu de refroidissement

Le meilleur choix sera la tremp à l'huile.

Pour les déplacements des courbes TTT des aciers alliés, voir page 170.

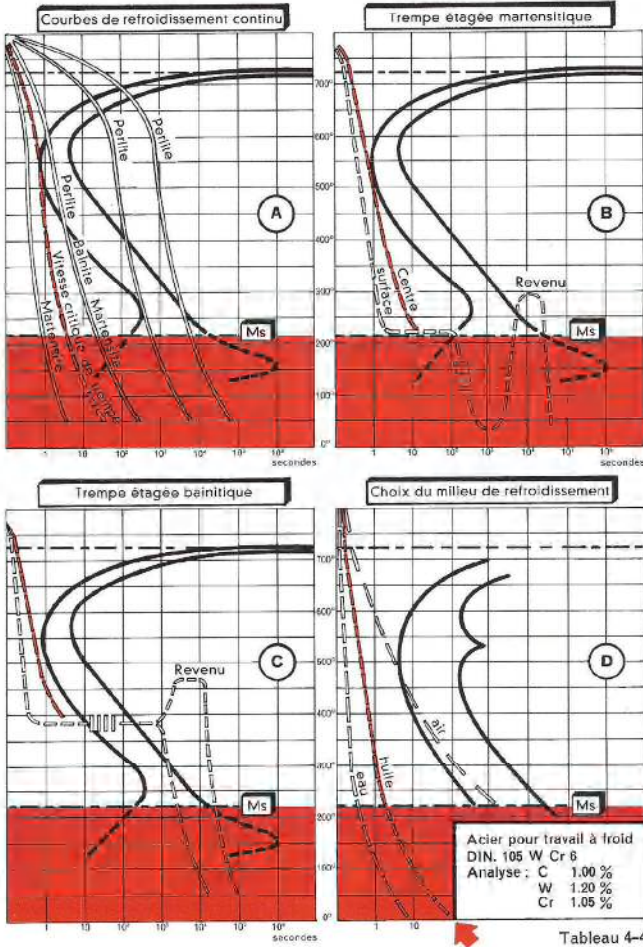


Tableau 4-4

4

4. 1. La trempe (pratique)
Fig. 4-5

La pleine réussite de la trempe dépend des conditions suivantes:

- Observation exacte des températures de trempe et du moyen de refroidissement, prescrits par les aciéries.
- Utilisation de four permettant un chauffage uniforme, ainsi que des appareils très précis pour le contrôle de la température.
- Il est avantageux de protéger les alésages et autres parties ne devant pas prendre la trempe, par une couche d'argile, d'amiante ou de pâte d'isolation du commerce.

Chauffage

Pour amener les pièces à la température de trempe, on procède de la façon suivante:

1. Une préchauffe

Les pièces sont chauffées lentement et progressivement jusqu'à:

600 à 650° pour les aciers au carbone; 800° pour les aciers rapides.

Remarque

Ne jamais mettre les pièces froides dans un four très chaud.

2. La température de trempe

Les pièces préchauffées sont placées dans un four chauffé à la température de trempe.

Remarque

Il faut obtenir rapidement la température de trempe.

3. Maintien de la température de trempe

Pour avoir une répartition régulière de la température, on compte normalement

pour une épaisseur de 10 mm de matière une durée de:

- 5 minutes pour les aciers faiblement alliés;**
- 10 minutes pour les aciers fortement alliés.**

Déformation des pièces

Les pièces sont disposées dans le four de manière à éviter toute déformation, souvent provoquée par leur propre poids. Ces déformations subsisteront après le refroidissement et pourront même amplifier au cours du refroidissement des pièces.

Remarque

Attention au transport des pièces, du four au bain de refroidissement.

Grossissement du grain (fig. 4-6)

Un chauffage trop élevé ou laissé trop longtemps à la température de trempe, provoque un grossissement du grain, et par ce fait rend l'acier cassant.

Remarque

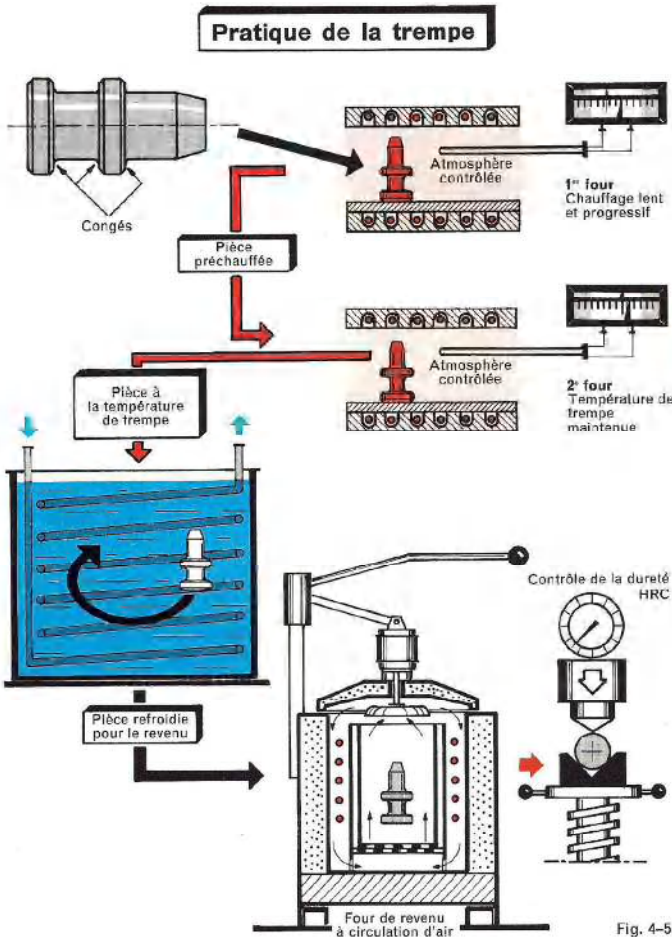
La température maximale est donnée pour les grandes pièces ou pour la trempe à l'huile des aciers au carbone. La température minimum pour les petites pièces ou pour la trempe à l'eau des aciers au carbone.

Décarburation

A moins qu'on ne dispose de fours à atmosphère contrôlée ou de bains de sels, il est recommandé d'emballer les pièces afin de les protéger contre l'oxydation et la décarburation. Le charbon de bois en grain préparé spécialement ou le coke calciné et pilé donnent de bons résultats.

Refroidissement

La vitesse de refroidissement dépend d'un grand nombre de facteurs:



4

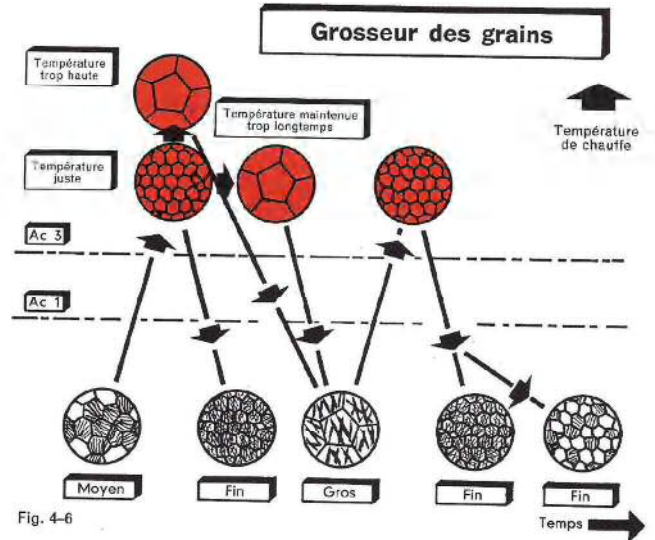


Fig. 4-6

1. Influence du bain de trempe

La nature du bain de trempe a une action sur la vitesse de refroidissement.

— Pour la trempe vive, l'eau. Une addition de 10% de sel de cuisine augmente encore l'effet de refroidissement.

— Pour la trempe douce, l'huile et l'air soufflé.

— Pour la trempe au bain chaud, un bain de sel.

2. Température des bains de trempe, 20° à 30° pour l'eau. Dès que la température de l'eau dépasse 30°, la trempe devient irrégulière.

50° environ, pour l'huile. Avec cette température, on obtient un meilleur effet de refroidissement.

Remarque

Un bac de trempe doit être conçu de façon à assurer le maintien à température constante du liquide, surtout s'il s'agit d'un traitement thermique exécuté en série.

Ce résultat s'obtient:

- 1. En donnant au bac la plus grande capacité possible.
- 2. En prévoyant un système de réfrigération.
- 3. Un renouvellement du liquide, s'il s'agit de l'eau.

3. Agitation du bain ou de la pièce

L'agitation du bain par un dispositif convenable ou de la pièce dans le bain favorise les échanges de chaleur, on

Fig. 4-5

assure une répartition identique du liquide sur toute la surface de la pièce.

4. Le volume du bain de tremp
L'augmentation du volume du bain limite évidemment l'élévation de sa température, donc favorise le refroidissement.

5. Présentation des pièces au bain de tremp

A la sortie du bain, on plonge les pièces immédiatement dans le bain suivant les conditions:

- les pièces longues seront trempées verticalement;
- les pièces à sections irrégulières seront immergées de façon à présenter la plus grosse partie au contact du liquide.

Forme des pièces

Les pièces qui seront trempées ne doivent pas avoir des différences de section trop brusques, ni des traces de tournage, celles-ci comme également les marques de poinçons provoquant très souvent de fortes tensions qui peuvent être la cause de fissures au moment de la tremp.

Il faut éviter autant que possible les différences de section trop brusques et les remplacer par un léger arrondi. Ces défauts d'usinage sont cause de ruptures prématurées d'outils soumis aux chocs ou vibrations.

Surépaisseurs

Après forgeage et recuit, la surface de l'acier est recouverte d'une couche de calamine rugueuse, présentant même une certaine décarburation.

Afin d'obtenir une surface parfaitement saine et présentant la pleine dureté, ainsi que pour éviter les fissures de tremp, il faut usiner la pièce sur toutes ses faces.

Il est nécessaire, lors de la commande, de prévoir les surplus de dimension pour l'usinage, comme indiqué ci-après, environ 5% des mesures finies:

Mesures finies ø	Surépaisseurs en général mm	Surépaisseurs pour acier de nituration mm
6—16	2	3
17—25	3	4
26—40	3	5
41—63	4	6
64—80	5	7
81—100	6	8
101—125	7	10
126—160	9	15
161—200	11	18
201—250	13	21
251—315	16	25
316—400	20	—
401—500	25	—

Modification des caractéristiques mécaniques du métal

Un tel traitement modifie très sensiblement les caractéristiques suivantes:

- la résistance à la traction a augmenté
- la contrainte de la limite élastique a augmenté
- la dureté HRC a augmenté
- la résistance à l'usure a augmenté
- l'allongement a diminué
- la résilience a diminué

4

Les fautes les plus fréquentes commises à la tremp

Faute	Conséquences		Réparation
	Dureté	Cassure	
Outil chauffé trop rapidement, pas à cœur ni uniformément	Dureté irrégulière, lime attaque à certains points, outil se fissure souvent, les coins s'écaillent	Grain irrégulier, certaines parties non trempées, d'autres correctement trempées ou surchauffées	Soumettre l'outil emballé à un recuit doux et le retremper correctement
Outil n'ayant pas subi un refroidissement suffisamment énergétique à la tremp (couche de vapeur isolante)	Dureté insuffisante, taches douces, surtout aux grandes surfaces. Lime attaque à certains points	Bon grain trempé aux arêtes seulement, pour le reste grain non trempé	Après recuit doux de l'outil emballé, le retremper avec un refroidissement plus énergétique en l'agitant dans le bain
Outil refroidi avec un réfrigérant trop doux pour l'acier employé (huile, air)	Dureté insuffisante et fréquemment irrégulière, lime attaque à certains points	Dans les parties douces grain semblable à celui de l'acier non trempé	Après recuit dans l'emballage, tremper à nouveau dans un réfrigérant plus énergétique
Outil refroidi avec un réfrigérant trop énergétique pour l'acier employé (par exemple eau salée)	Bonne dureté, surface présentant dureté de verre, lime n'attaque pas, tapures de tremp, forte déformation	Cassure semblable à celle de l'acier correctement trempé	Pourvu que les outils soient encore utilisables, opérer un recuit doux dans l'emballage et tremper à nouveau à la température correcte et dans un réfrigérant convenable.
Outil chauffé insuffisamment, la température de tremp nécessaire n'a pas été atteinte	Outil ne présentant aucune dureté ou une dureté insuffisante. La lime attaque	Grain ressemble à celui de l'acier non trempé	Recuire l'outil dans l'emballage et le retremper à la température juste, plus élevée
Outil chauffé au-dessus de la température qui convient — « surchauffé »	Bonne dureté, lime n'attaque pas, mais fréquemment fissures, fortes déformations, ruptures au travail	Grain fin à grossier, d'un certain brillant, parfois scintillant	Soumettre les outils emballés à un recuit doux et les tremper à nouveau à la température correcte. Les outils fissurés à la tremp sont généralement inutilisables.
Outil très fortement surchauffé, « brûlé »	Fréquemment dureté insuffisante, lime n'attaque pas, éclatement à la tremp, ruptures au travail	Grain grossier d'un fort brillant blanc	Un outil brûlé n'est plus réparable.
Outil décarburé à sa surface pendant la chauffe (un usinage insuffisant de l'acier brut recuit à les mêmes conséquences)	Dureté obtenue parait insuffisante, lime attaque la surface; sous la surface douce la dureté est souvent bonne	Surface de cassure montre souvent aux bords un grain semblant à celui du fer fondu. Sous cette zone le grain est celui de l'acier correctement trempé	Entever à la meule la couche décarburee. En cas de décarburation profonde recuire l'outil, l'usiner suffisamment et le tremper à nouveau (si nécessaire employer un emballage à la chauffe ou chauffer au bain de sels)

N'oubliez jamais que deux ou plusieurs fautes peuvent être commises à la fois!

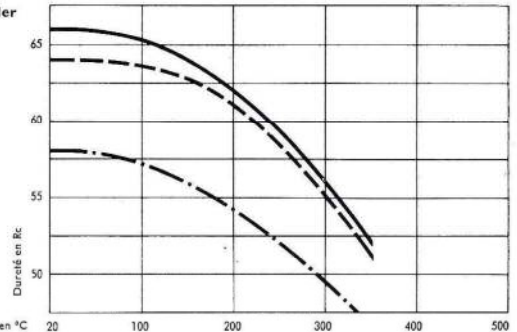


BOEHLER

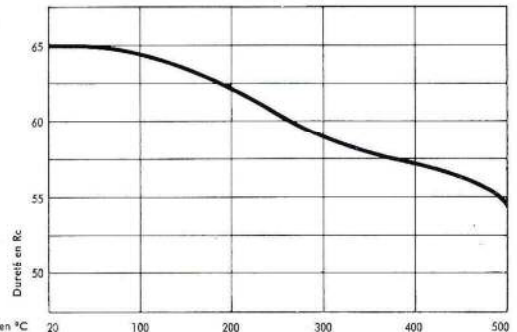
Couleurs de revenu
en fonction de la composition de l'acier
et de la durée de chauffage

Couleurs d'incandescence

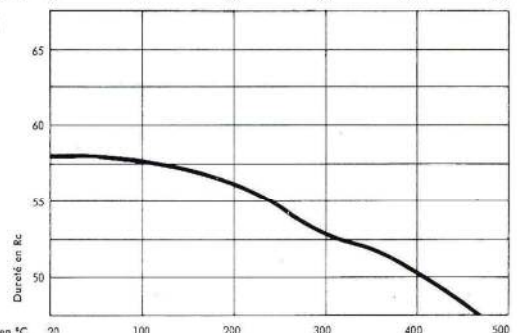
Aciers à Outils Boehler non alliés
— 0,90—1,30% C
- - - 0,60—0,85% C
- · - · 0,45% C



Boehler ☆ Spécial K
Analyse type:
C 2; Cr 13%



Boehler ☆ MY Extra
Analyse type:
C 0,48; Si 0,9
W 1,7; Cr 1,0%



Couleurs de Revenu

Température de revenu en °C	ACIERS A OUTILS BOEHLER NON ALLIÉS 0,45-1,35% C			BOEHLER ⚡ SPECIAL K Analyse type: C 1; Cr 13%			BOEHLER ⚡ MY EXTRA Analyse type: C 0,45; Si 0,9; W 1,9; Cr 1,0%			Température de revenu en °C
	5	20	35	5	35	5	35	5	35	
380										380
360										360
340										340
320										320
300										300
290										290
280										280
270										270
260										260
250										250
240										240
230										230
220										220
200										200

Au point actuel de la technique du traitement thermique, il ne suffit plus d'effectuer un revenu sans en contrôler la température. Il arrive toutefois que, pour maintes raisons, l'on soit obligé d'évaluer la température d'un revenu d'après les couleurs qui apparaissent sur la pièce traitée. On n'obtiendra, cependant, de bons résultats qu'en veillant soigneusement à tous les phénomènes qui se produisent lors de ce procédé.

En considération de cela, nous avons élaboré le tableau reproduit au verso. C'est la première fois que l'utilisateur dispose ainsi d'un tableau pour la pratique de tels traitements, montrant les couleurs de revenu telles qu'elles apparaissent sur des surfaces métalliques propres et nues, en fonction de la composition chimique et du temps de chauffage.

Pour mieux illustrer l'influence de l'alliage, nous avons choisi, en dehors de nos aciers à outils, non alliés, notre acier ledeburitique pour outils de découpage, à 13% de chrome, BOEHLER ⚡ SPECIAL K, ainsi que l'acier à burins résistant aux chocs, BOEHLER ⚡ MY EXTRA. L'on pourra ainsi classer d'autres aciers à outils, selon leur pourcentage en éléments d'alliage — surtout en chrome et en silicium — d'après les qualités illustrées ici.

La température nécessaire à l'obtention de la dureté d'utilisation recherchée, ressort de la courbe de revenu propre à l'acier considéré; les couleurs correspondant à une telle température, sont reproduites dans le tableau ci-avant.

Selon le volume de l'outil et la capacité calorifique disponible, le temps de chauffage sera différent. Il en résulte une coloration différente, pour une même température (oxydation de la surface). La coloration à atteindre pour une température de revenu déterminée, est donc également fonction de la durée de chauffage.

Lors d'un revenu «à la couleur», il est souvent difficile de fixer d'avance la durée de chauffage à observer, de même que de la respecter. Il y a donc lieu de s'attendre à de petites variations des valeurs de dureté lesquelles seront d'autant plus grandes que le temps de chauffage aura été bref.



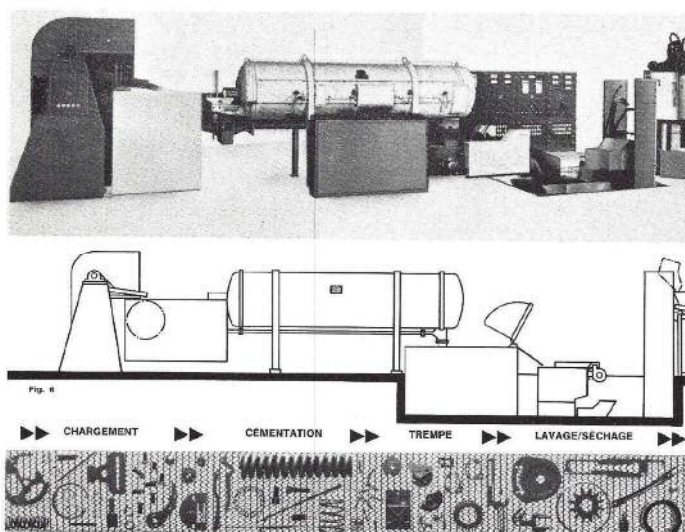
Réproduction d'après photos en couleur des éprouvettes-témoin. Tous droits réservés.

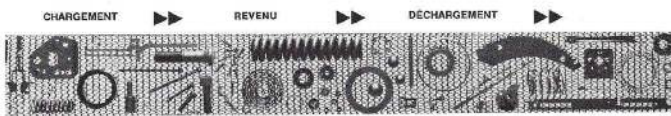
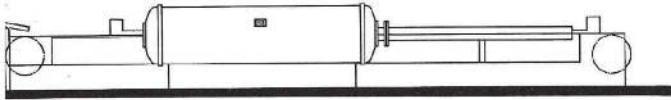
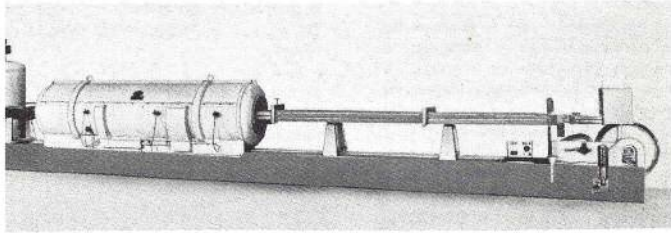
Couleurs d'incandescence

Température en °C		Température en °C
1300		1300
1200		1200
1100		1100
1000		1000
950		950
900		900
850		850
810		810
780		780
740		740
680		680
630		630
550		550

Les installations de tremp

Fours continus automatiques à bande transporteuse pour traitements thermiques.





SA du Four Electrique
Delémont Suisse

4

4. 2. Le revenu (théorie)

(fig. 4-7)

Après la trempe, l'acier est extrêmement dur et fragile, il ne pourrait en aucun cas servir aux emplois auxquels il était destiné.

But

Le but du revenu est de diminuer les effets de la trempe, et d'atténuer ou de faire disparaître les tensions internes par les traitements thermiques suivants:

- un chauffage entre 100 et 650°
- maintenir cette température
- un refroidissement, en général à l'air

Nouvelle structure: LA SORBITE.

Pendant le chauffage, la martensite, solution solide de carbone dans le fer alpha, est transformée en un constituant nouveau, la sorbite, agrégat de fer et de carbure de fer (Cémentite) analogue à la troostite.

Le grain de sorbite est constitué de lamelles très minces de carbure de fer, disposées entre les couches très fines de fer.

La sorbite est presque aussi dure que la martensite mais beaucoup moins fragile.

Diminution de la dureté avec l'augmentation de la température

Un acier trempé qu'on chauffe à moins de 150° ne subit aucune diminution sensible de sa dureté.

Si l'on propose d'augmenter la ténacité d'une manière plus prononcée et en conséquence d'obtenir une dureté plus faible, on déterminera la température adéquate en se servant du diagramme de revenu correspondant à l'acier dont il s'agit.

4. 2. Le revenu (pratique)

Vu la nécessité d'un contrôle rigoureux de la température, l'emploi de fours de revenu spéciaux est à recommander.

Chauffage

Le chauffage se fera lentement jusqu'à la température de revenu.

On se sert avantageusement pour le revenu:

- soit d'un four à circulation d'air
- soit d'un liquide
 - bain d'huile
 - bain de sels
 - bain d'eau

Durée de revenu

Suivant les expériences, le plein effet du revenu ne peut être réalisé que si la durée a été suffisante.

Elle sera d'une demi-heure et jusqu'à deux heures pour 10 mm de matière. Pour les températures basses, on choisira les durées de revenu plus longues que pour les températures hautes.

Refroidissement

Le refroidissement est exécuté généralement à l'air.

Un refroidissement trop rapide peut provoquer de nouvelles contraintes.

Revenu à la couleur

A défaut d'appareils de mesure, on peut juger de la température de revenu d'une pièce d'après la couleur que prend sa surface préalablement blanchie à la toile abrasive.

Remarque

Pour les aciers fortement alliés, il faut tenir compte du fait que les couleurs de revenu apparaissent à des températures supérieures, observées pour les autres aciers.

Diagrammes de revenu

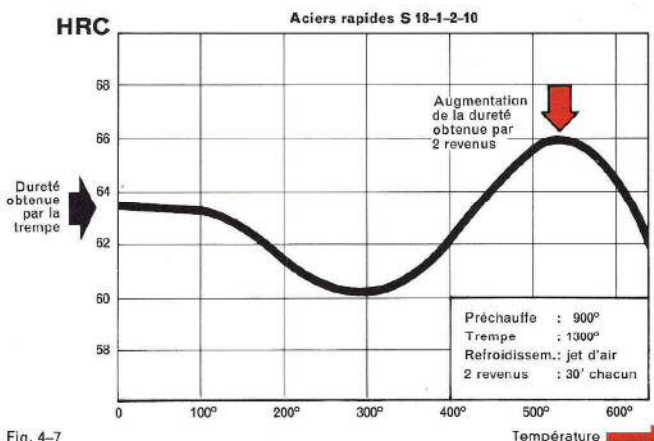
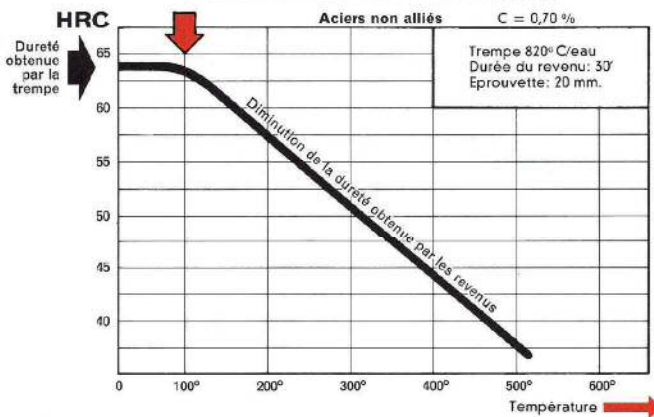


Fig. 4-7

4

Cette méthode empirique, qui est fonction de l'épaisseur de la couche d'oxyde, de l'éclairage de l'atelier et de l'œil de l'opérateur ne peut donner de résultats précis et constants.

4. 3. Les traitements thermiques de l'acier rapide

(fig. 4-8)

Important

Le traitement thermique correct des outils en acier rapide est aussi important que l'élaboration de l'acier lui-même.

Analyse

L'analyse chimique montre qu'ils renferment, indépendamment du fer, les éléments suivants:

Carbone: forme des carbures, augmente la résistance à l'usure, détermine la dureté de la masse de fond (matrice).

Tungstène ou molybdène: forme des carbures spéciaux très durs, améliore la dureté à chaud, la résistance au revenu et à chaud de la matrice.

Vanadium: forme des carbures très durs, augmente la résistance à l'usure à chaud, la résistance au revenu et la dureté à chaud de la masse de fond.

Chrome: assure la pénétration de trempe et forme des carbures facilement solubles.

Cobalt: ne forme pas de carbures mais reste dissous dans la masse, augmente la dureté à chaud et la résistance au revenu de la matrice.

4. 3. 1. Trempe

(températures très élevées)

Pour que la martensite atteigne par la trempe pleine dureté, il faut que l'austénite absorbe dans la zone de la température de trempe, suffisamment de carbone, de tungstène, de molybdène et de vanadium.

La dissolution des carbures précipite les pourcentages d'alliages nécessaires. Les quantités requises des carbures ne pouvant être dissoutes qu'à des températures très élevées, 1180 à 1320° (suivant la masse de l'acier).

Structure

La structure de l'acier rapide trempé se compose d'environ 70% de martensite, 20% d'austénite résiduelle et 10% de carbures non dissous.

Dureté (après la trempe)

La dureté après trempe se situe à peu près à 61-63 HRC.

4. 3. 2. Revenu

(fig. 4-7)

Important

On obtient également, par le revenu, pour cette catégorie d'aciers une certaine détente, mais le but principal de l'opération n'est pas une diminution, mais une augmentation de la dureté et de la résistance à l'usure.

Austénite résiduelle

On trouve toujours, dans ces catégories d'aciers à l'état trempé, la présence, à côté de la martensite, de l'austénite résiduelle, en quantité variant selon la température de trempe et le mode de refroidissement employé. Par le chauffage du revenu, 580° à 600°, on arrive à détendre la martensite,

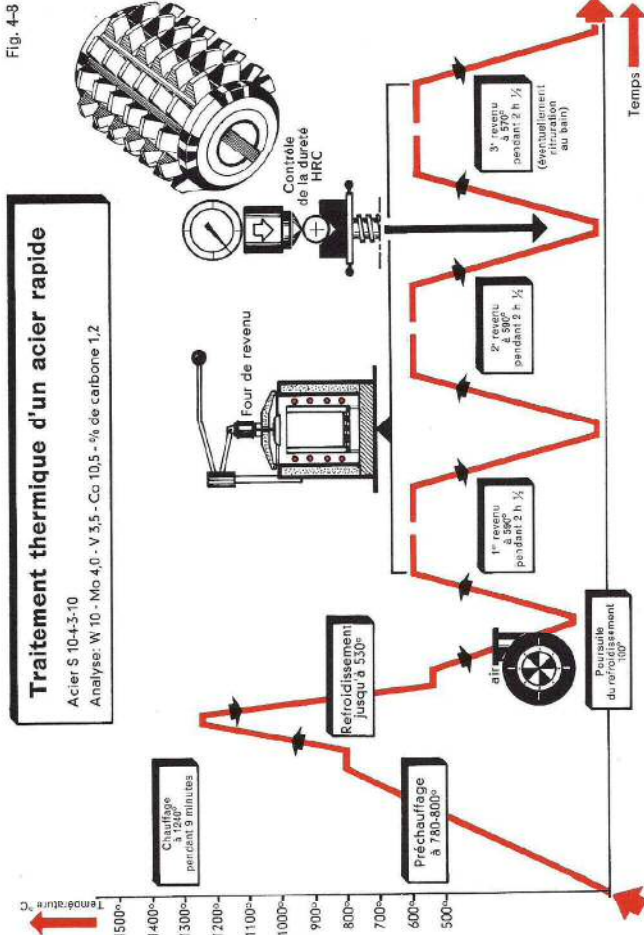


Fig. 4-3

Traitement thermique d'un acier rapide
 Acier S 10-4-3-10
 Analyse: W 10 - Mo 4,0 - V 3,5 - Co 10,5 - % de carbone 1,2

4. 4. Les recuits
 (fig. 4-9)

Généralités

Toute pièce compliquée, ayant obtenu sa forme définitive par un façonnage à chaud, nécessite avant l'usinage un recuit. En général, on ne tient pas assez compte que le fraisage, le tournage ou le rabotage provoquent également des tensions dans l'acier. Ces tensions peuvent être l'origine de déformations et de fissures au moment de la trempe.

Décarburation

La décarburation en cours de chauffage s'évite, si l'on empêche tout contact entre l'acier et l'oxygène, par une atmosphère neutre, ou en enfouissant les pièces dans des caisses remplies de copeaux de fonte.

4. 4. 1. Recuit de normalisation N

Les aciers de moins de 1% de carbone (aciers de construction) sont le plus souvent soumis au recuit de normalisation.

Température de chauffage

L'opération consiste à chauffer l'acier juste au-dessus du point Ac3, transformation de la structure en austénite. L'acier est maintenu à cette température juste quelques minutes.

Refroidissement

Le refroidissement s'effectue à l'air libre.

But

Régulariser la structure. Diminuer la grosseur du grain d'un acier surchauffé.

et lors du refroidissement qui suit cette opération, une partie de l'austénite résiduelle se transforme à son tour en martensite.

Double revenu

Comme cette martensite nouvellement constituée n'a pas encore été soumise au revenu, elle est très fragile, il est donc nécessaire de procéder à un deuxième revenu, dont la température sera environ la même.

Augmentation de la dureté

Le deuxième revenu sert avant tout à détendre la nouvelle martensite, mais il opère en même temps une nouvelle transformation en martensite d'une petite partie du solde d'austénite résiduelle.

Remarque

La dureté étant fonction de la quantité de martensite, on comprend donc l'augmentation de la dureté.

Structure

La structure d'un acier rapide correctement traité se compose de martensite revenue, de carbures spéciaux (ledeburétiques) et de moins de 8% d'austénite résiduelle.

Le revenu améliore aussi la ténacité

Remarques

L'avantage de la nitruration ne se manifestera pleinement que si les outils en acier rapide sont nitrurés après avoir été trempés, revenus et finis à la meule.

Voir aciers rapides et leurs emplois. Tableau 5. 4. 8. Page 186

4. 3. 3. Nitruration (au bain)

Le traitement confère aux surfaces une résistance à l'usure particulièrement élevée.

La dureté de coupe des outils peut être augmentée de 10% et même davantage.

4. 4. 2. Recuit doux G

Avec le recuit doux, on transforme les plaques de cémentite dans la perlite et le réseau de cémentite en excès, de telle façon qu'il adopte la forme de boule appelée cémentite sphéroïdisée.

Remarque

Le recuit doux ordinaire ne se pratique pas pour les aciers de moins de 0,4% de carbone.

But

Bonne structure pour l'usinage et très favorable pour la trempe. L'acier est plus doux et plus malléable. Perte des tensions internes, occasionnées par le travail à chaud.

Recuit doux de l'acier hypoeutectoïde

Température de chauffage

L'acier est chauffé à une température à peine au-dessus du point Ac1, et laissé osciller autour de ce point pendant une durée de trois à quatre heures.

Refroidissement

Laisser refroidir lentement dans le four, à une vitesse de 20 à 30° par heure, jusqu'à 600° environ, puis continuer le refroidissement à l'air libre.

Recuit doux de l'acier hypereutectoïde

Il importe non seulement de transformer la perlite-cémentite en forme de boule, mais de sphéroïdiser l'excédent de cémentite.

Température de chauffage

La température du recuit est liée avec la teneur en carbone, donc augmentation de carbone = augmentation de température.

Le maintien de la température est de deux à quatre heures.

Refroidissement

Laisser refroidir lentement dans le four, à la vitesse de 20° par heure, jusqu'à la température de 600°. Le refroidissement peut se poursuivre à l'air libre sans Inconvénient.

4. 4. 3. Recuit de stabilisation ou recuit intermédiaire

Ce recuit n'a pas pour but de modifier la structure de l'acier ni d'en atténuer la dureté.

Température de chauffage

L'acier est chauffé à une température de 550 à 650° pendant une demi-heure à deux heures.

Refroidissement

On laissera refroidir lentement dans le four même.

But

Eliminer les tensions internes après le soudage, ou celles d'un travail préliminaire à chaud ou à froid.

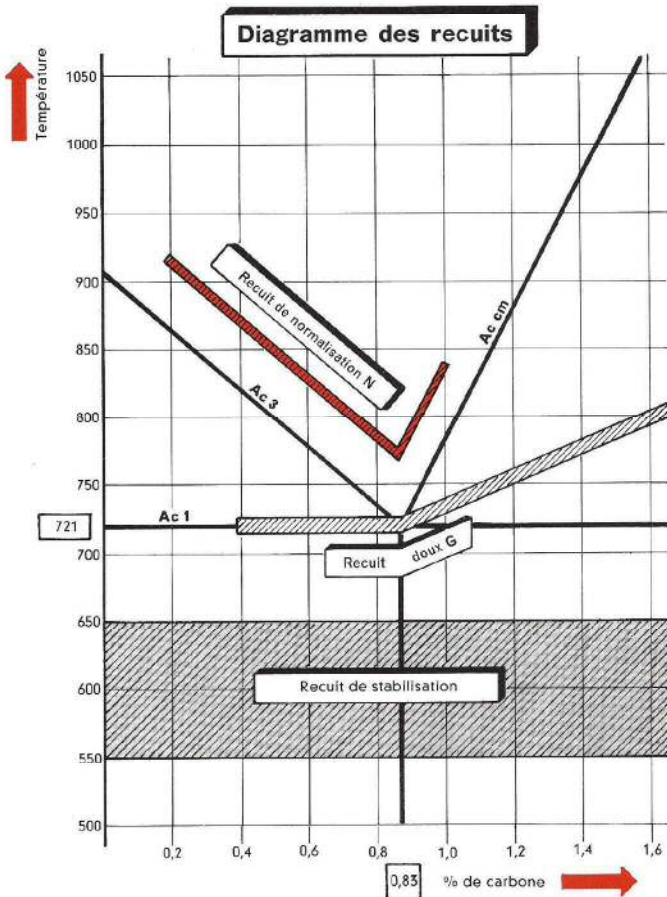


Fig. 4-9

4

4. 5. Les durcissements de surface

But

Dans de nombreux cas, une pièce finie doit avoir non seulement une dureté égale à l'acier trempé, mais une bonne résilience.

Elle doit être de composition hétérogène.

- L'intérieur, en acier doux, assure la résilience désirée.
- L'extérieur, en acier dur, permet d'obtenir la dureté recherchée.

Les méthodes les plus importantes de durcissement superficiel pour les pièces ayant leur forme définitive sont:

- la **cémentation**
- la **nituration**
- la **tempe superficielle** (induction ou à la flamme)

Voir aciers de cémentation et leurs emplois. Tableau 5. 3. 2. Page 173

4. 5. 1. Cémentation

La cémentation est un traitement qui permet, sous l'effet de la chaleur, d'introduire du carbone à l'acier doux et former une couche extérieure plus ou moins profonde, de 0,2 à plusieurs millimètres, apte à prendre la tempe.

La cémentation comporte donc deux phases successives:

1. **Cémentation proprement dite** (carburation)
2. **Traitements thermiques** (tempe, revenu)

1. Cémentation proprement dite

Principe

Pour enrichir en carbone la surface de la pièce, on dispose celle-ci au sein d'un milieu, appelé **cément**, susceptible de lui céder du carbone. Le tout porté à une certaine température.

Remarque

Quel que soit l'état physique du cément, le carbone est apporté à l'acier par l'intermédiaire de gaz carboniques qui, au contact du fer, se décomposent en libérant le carbone qui se dissout dans le métal.

La température, 815 à 930° environ. Le diagramme d'équilibre des alliages fer-carbone montre que la solubilité du carbone, pratiquement nulle dans le fer (alpha) devient relativement grande dans le fer (gamma) passant de 0,83% pour une température de 721° à 1,7% pour une température de 1145°. (Voir chapitre 3.)

Remarque

Il est donc nécessaire de chauffer au-dessus du point de transformation Ac3 de l'acier à cémenter pour permettre la dissolution du carbone par le fer (gamma).

Epaisseur de la couche cémentée: 0,2 à plusieurs millimètres.

L'épaisseur a un rapport avec la fonction, mais au maximum 1/10 de l'épaisseur de la pièce.

Pour des pièces subissant une usure, l'épaisseur sera plus grande que pour des pièces supportant des chocs.

La profondeur de pénétration et la teneur en carbone dépendent:

- de la température
- du cément utilisé
- de la durée de l'opération

4

La teneur en carbone (fig. 4-10):

La couche cémentée présente dans son épaisseur toutes les nuances d'aciers correspondant à la variation de la teneur en carbone en surface, de 0,8% à 1%, à la teneur en carbone de l'acier de cémentation, 0,2%.

Epaisseur utile de cémentation: les deux tiers de la couche cémentée.

L'épaisseur utile de la couche recarburée est comptée à partir d'une teneur voisine de 0,4% de carbone.

Vitesse de pénétration du carbone (fig. 4-11)

La couche cémentée ne croît pas de façon linéaire avec le temps, mais rapidement au début, puis de plus en plus lentement avec l'augmentation de la durée de la carburation.

Protection des parties ne devant pas être cémentées

- On peut protéger les parties par les moyens suivants:
- cuivrage électrolytique
 - une surépaisseur de matière qu'on aura soin d'enlever après la cémentation, c'est-à-dire avant la tempe.

Les céments

Un bon cément doit avoir:

- un effet constant de carburation
- une composition parfaitement définie
- le pouvoir d'être utilisé un grand nombre de fois

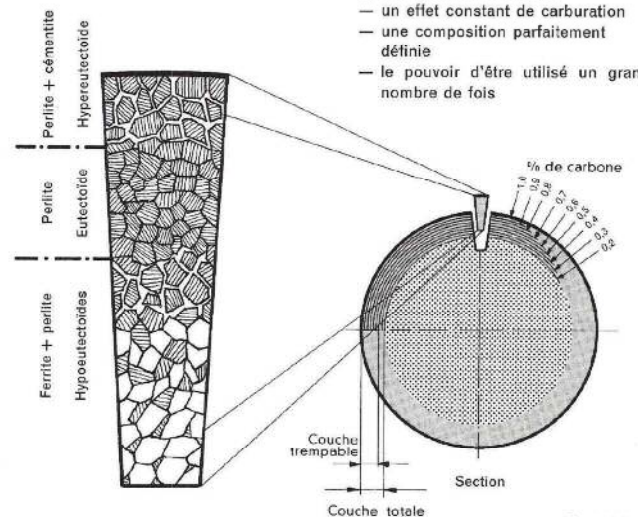


Fig. 4-10

Tableau des ciments

Etats	Les porteurs de carbone	Les activateurs	Régénération	Généralités
A. SOLIDE	Le coke Le charbon de bois	Carbonate de baryum	Addition de 10% de ciment neuf après chaque emploi	Les ciments actuels sont granulés et imprégnés de produits agglomérants dans toute la masse
B. LIQUIDE	Le cyanure de sodium	Des sels contenant des chlorures alcalins-torveux	Addition de sel frais régulièrement	Pour compléter les bains cyanurés, on suivra de préférence les indications des fournisseurs de sel
C. GAZEUX	Gaz naturel Méthane	Propane		Avec un mélange gazeux bien défini, stable et renouvelé par circulation, la carburation reste constante

4

Vitesse de pénétration

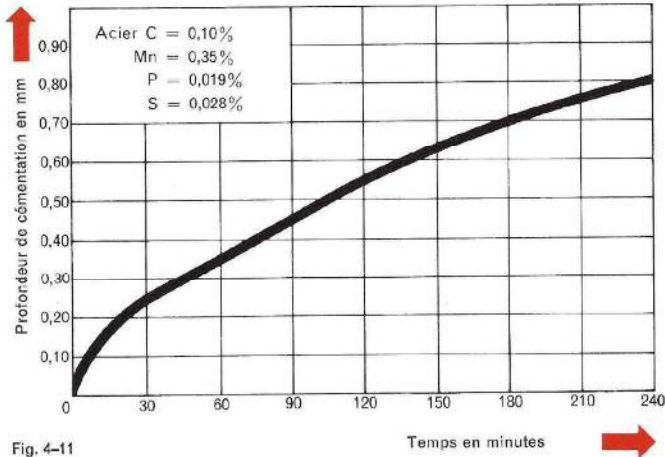


Fig. 4-11

Pratique des opérations
(fig. 4-12)

Les pièces doivent présenter, avant la cémentation, des surfaces métalliques absolument propres et exemptes de gras.

4.5.1.1. Cémentation solide A

① Les pièces sont disposées dans des boîtes de façon à ménager entre elles et les parois une épaisseur de ciment de 10 à 20 mm environ.

Les boîtes sont fermées avec un couvercle et les joints rendus étanches avec de l'argile. On évite ainsi la combustion du ciment.

② Les boîtes sont disposées dans un four et chauffées à la température de cémentation pendant le temps nécessaire.

Remarque

Les boîtes sont choisies de dimensions aussi petites que possible de façon à permettre une répartition uniforme et rapide de la température de chauffe et de refroidissement.

Dans le cas de grosses pièces, on emploie des boîtes individuelles.

③ **Contrôle**

Les éprouvettes de même acier que les pièces pénètrent dans la boîte par une ouverture, permettant de contrôler la cémentation au cours de l'opération.

Elles sont préalablement sciées à moitié et sont cassées après cémentation et trempe.

④ Généralement on laisse les pièces se refroidir dans les caisses, le tout à l'air.

L'extraction des pièces de leurs boîtes, lorsqu'elles sont encore à haute température, provoque par combustion une perte importante de ciment et ne permet pas d'obtenir un traitement thermique précis.

4.5.1.2. Cémentation liquide B

Lorsque le bain de sels métalliques est fondu à la température de cémentation, on immerge les pièces fixées par un fil de fer. Les pièces peuvent être aussi disposées en vrac dans des paniers en tôle perforée.

Avantages

La chauffe est plus régulière, la température du bain est contrôlée par une canne pyrométrique.

La décarburation des pièces à la sortie du bain est éliminée par une légère couche de sel sur les surfaces.

La trempe peut être effectuée à la sortie du bain.

Remarque

Les pièces introduites dans le bain doivent être bien sèches, afin d'éviter toute projection de sel.

4.5.1.3. Cémentation gazeuse C

Les pièces, disposées dans un moufle en acier réfractaire chauffé de l'extérieur, sont entourées d'un mélange gazeux, carburant, bien défini, stable et renouvelé par circulation.

Avantage

Les conditions de carburation peuvent être réglées à volonté, par un dosage approprié de l'activateur.

Les pièces cémentées restent propres. Une cémentation plus rapide.

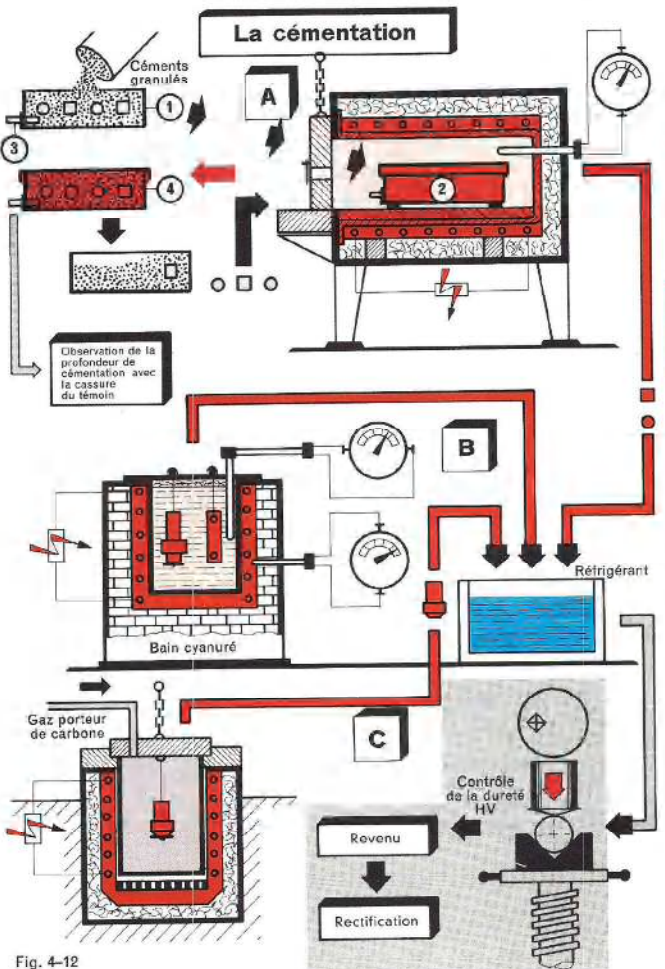


Fig. 4-12

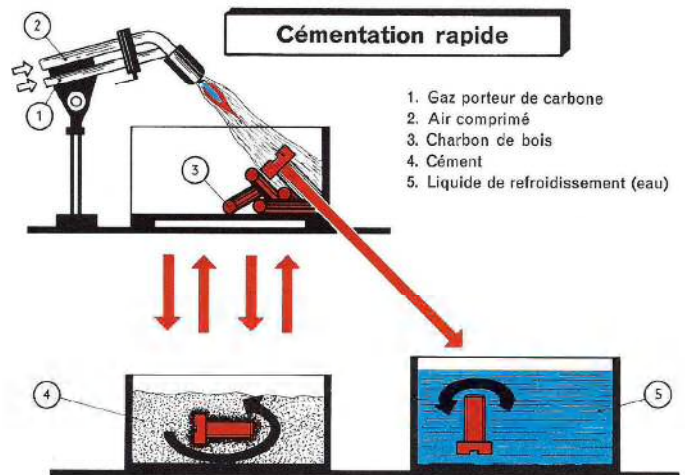


Fig. 4-13

4.5.1.4. Cémentation rapide

(Fig. 4-13)

Le ferrocyanure, vendu sous le nom de prussiate, est utilisé comme ciment brusque lorsqu'on désire obtenir rapidement une couche très dure de quelques $\frac{1}{100}$ de mm sur un organe de machine (vis, rondelles, etc.).

Mode opératoire

On chauffe les pièces au-dessus du point Ac3, puis, par intervalle, on plonge les pièces dans le ciment et on les réchauffe pour finalement les tremper dans l'eau.

2. Traitements thermiques

Trempe A

On refroidit les pièces dans la caisse après la carburation, de façon que l'austénite se transforme complètement en perlite/ferrite.

On les réchauffe ensuite à la température de trempe désirée, pour les plonger dans un réfrigérant.

Remarque

Il est possible d'effectuer des opérations d'usinage avant la trempe.

Trempe BC

Les pièces sont immédiatement trempées à la fin de la carburation. Suivant les cas, on pourra abaisser la température de trempe $Ac_3 + 50^\circ$ du pourcentage de carbone de la couche cémentée.

Les réfrigérants

Le refroidissement peut être effectué:

- dans l'eau
- dans l'huile
- au bain chaud avec refroidissement final à l'air

Remarque

Le choix du ciment et le moyen de refroidissement sont en rapport avec l'acier employé.

Revenu

Les pièces cémentées sont habituellement soumises à un traitement de revenu entre:

- 150° et 180° pour les aciers non alliés
- 160° et 210° pour les aciers alliés

Remarque

Un revenu améliore la rectification et diminue la sensibilité des pièces cémentées aux fissures de meulage.

4

Le Mo a le rôle d'empêcher la fragilité du revenu, particulièrement à craindre aux températures de nitruration.

Remarque

Le déroulement de la nitruration est accompagné d'une augmentation de volume de $\frac{2}{100}$ de mm environ.

Fragilité

Il faut agir avec les plus grandes précautions lors du transport et du stockage des pièces nitrurées.

Le moindre choc fait courir le risque de fissure dans la couche nitrurée.

Il ne faut travailler qu'avec des matériaux de bois ou de caoutchouc lors du montage.

Profondeur

0,8 mm au maximum. Voir diagramme fig. 4-14.

Durée de l'opération

Diagramme fig. 4-14.

Avantages

- On laisse refroidir les pièces dans le four
- La déformation est nulle
- La couche nitrurée présente une certaine résistance à la corrosion
- Bonne résistance à la fatigue
- Propriétés excellentes de glissement
- Grande résistance à l'usure
- La couche nitrurée conserve sa dureté jusqu'à 500° environ
- Amélioration de la résistance à l'usure des outils en acier rapide, nitrurés après la trempe et le revenu.

4

4. 5. 2. Nitruration

Le but de la nitruration est de durcir superficiellement l'acier, par l'action de l'azote.

Principe

La nitruration consiste à soumettre l'acier, chauffé à une certaine température, à l'action d'un courant d'ammoniac gazeux.

Le gaz ammoniac (NH_3) réagit avec la surface de l'acier (catalyseur) pour former de l'azote naissant, qui pénètre dans la surface de l'acier alpha et l'hydrogène (H) est libéré.

Température: 500 à 525° environ.

Le point eutectoïde de l'alliage fer/azote se trouve, pour un taux d'azote de 2,3%, à une température de 590°. Aux températures plus élevées apparaissent des combinaisons Fe/N appelées nitrures, très fragiles et par conséquent absolument pas souhaitables.

Les températures sont donc situées au-dessous de cette température critique.

Dureté

HV 1000-1200

L'influence de l'azote sur les propriétés mécaniques des aciers ordinaires est relativement peu marquée.

Cet accroissement de dureté ne peut être attribué qu'aux aciers alliés Cr Al Mo, par la formation de nitrures AlN ou CrN, qui, insolubles dans le fer alpha, s'insèrent dans le réseau cristallin.

La finesse de cette répartition entraîne le blocage de presque tous les plans de glissement, d'où augmentation de la dureté.

Pratique des opérations

(fig. 4-14)

Préparation des pièces

A Ebaucher les pièces

B Traitements thermiques

Trempe à l'huile, 870-900°

Revenu à l'air, 580-650°

Le revenu doit avoir une température supérieure à celle de la nitruration, pour éviter une modification des propriétés mécaniques au cours de l'opération.

C Achèvement de l'usinage

D Nitruration gazeuse

Les pièces sont nettoyées et dégraissées par un lavage aux ultrasons dans du tri- ou du perchloréthylène.

- Dans une cuve en tôle d'acier fortement allié, au Cr-Ni, résistante à la température et à la nitruration, les pièces sont disposées sur des grilles
- La cuve est fermée par un couvercle, boulonné avec un joint, pour assurer une étanchéité parfaite
- Les fours utilisés sont généralement des fours électriques fortement calorifugés et munis d'un bon dispositif de régulation de la température
- Le gaz ammoniac comprimé est amené à l'aide d'une bouteille
- Il faut avoir environ 97% de gaz ammoniac dans la cuve avant d'augmenter la température
- Après le temps nécessaire, on laisse refroidir jusqu'à 100° environ, avant d'enlever les pièces

Voir aciers de nitrurations et leurs emplois. Page 176

Important

Il ne faut en aucun cas laisser entrer de l'air ou de l'oxygène pour le refroidissement, il se formerait un gaz tonnant.

Nitruration liquide

L'opération de nitruration peut être aussi effectuée dans des bains de sels nitrurants.

E Rectification éventuelle de quelques centièmes de millimètre — Rodage

F Contrôle de la dureté HV

Remarque

Suivre les indications des fournisseurs pour chaque cas particulier.

Protection

La protection de certaines parties des pièces contre la nitruration s'obtient par étamage ou badigeonnage à l'aide d'un pinceau avec une pâte formée de sulfure de résine, de poudre d'étain et de plomb.

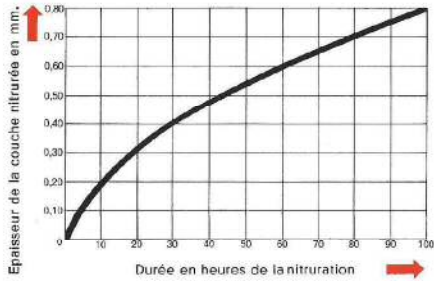
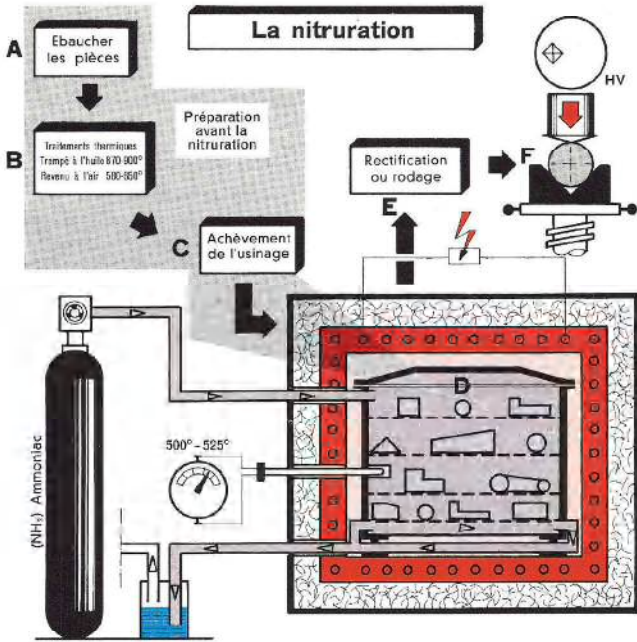


Fig. 4-14

4. 6. Essais de trempabilité «Jominy»

(Fig. 4-15)

Généralités

Une éprouvette prélevée dans l'acier à examiner est portée à la température de tremp, puis refroidie à sa base par un jet d'eau.

La dureté enregistrée sur l'extrémité refroidie et le long d'une génératrice de l'éprouvette permet de contrôler la trempabilité de l'acier.

Eprouvette

Un recuit de normalisation est nécessaire avant la tremp (la dureté est influencée par la grosseur du grain).

Température de tremp

On chauffe l'éprouvette à l'abri de l'air (oxygène), en évitant toute décarburation, pendant trente à quarante minutes pour atteindre la température de tremp ($A_c 3 + 50^\circ C$) que l'on maintient pendant vingt minutes.

Refroidissement

On règle le jet d'eau de manière qu'il monte librement (sans éprouvette) à 65 mm de l'orifice du jet de diamètre 12 mm.

Le jet d'eau est commandé par un robinet à fermeture instantanée de façon que ce dernier frappe aussitôt toute la surface de la base de l'éprouvette.

Essais de dureté

L'éprouvette trempée est meulée sur 0,4 mm de profondeur, en vue de former deux méplats à 180° , avec une meule abondamment arrosée afin d'éviter tout échauffement.

La dureté est exprimée en unité HRC, mais on peut utiliser HV.

Courbes de trempabilité

L'éprouvette est soumise à une série de mesures de dureté tous les 1,5 à 2 mm depuis la surface trempée, sur les premiers 25 mm. Les autres mesures sont faites à des intervalles suffisants pour permettre le tracé de la courbe de dureté sur le diagramme.

Remarques

Les courbes Jominy sont utilisées comme essai rapide pour qualifier la trempabilité en comparant la courbe obtenue avec des courbes relatives à des aciers connus.

Elles permettent de déterminer les duretés réalisables à différentes vitesses de refroidissement, allant de la tremp rapide à l'eau jusqu'à la tremp lente à l'air.

Courbes de trempabilité obtenues par la méthode JOMINY

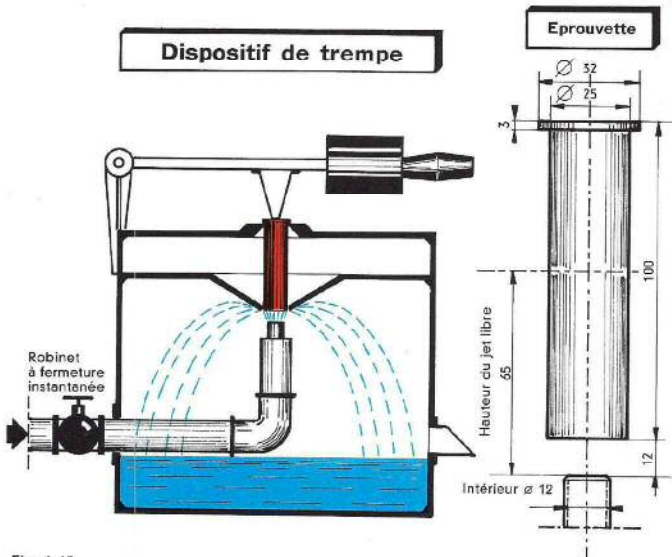
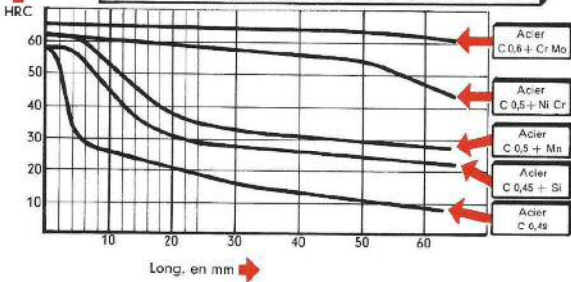


Fig. 4-15