

NOTES DIVERSES

LES ACIERS DE QUALITÉ.

Leur fabrication
dans les aciéries spéciales de la Ruhr

PAR

L. J. TISON

Ingénieur des Ponts et Chaussées,
ex-chef du groupe de Dusseldorf de la M. I. C. U. M.

CHAPITRE I^{er}. — GÉNÉRALITÉS

I. — Classification

On est souvent tenté de considérer comme acier spécial tout acier allié, c'est-à-dire tout alliage forgeable de fer auquel certaines additions d'autres corps ont donné des propriétés qu'un acier ordinaire ne possède pas. Mais comme, d'autre part, on donne couramment d'un acier ordinaire, cette définition : « alliage de fer-carbone contenant de faibles quantités de *Si*, *Mn*, etc. », on est fatalement amené à fixer *arbitrairement* des teneurs de ces divers éléments pour pouvoir établir une limite entre aciers spéciaux et ordinaires.

Mieux vaut baser la notion d'aciers de qualité et leur subdivision sur leur utilisation. Les aciers spéciaux seront alors ceux qui recevront une composition et un traitement déterminés en vue de l'emploi auquel ils sont réservés.

Et, partant de cette définition, nous classerons les aciers en deux grandes classes :

1. Les aciers de construction ;
2. Les aciers à outils.

Une troisième classe, que l'on pourrait d'ailleurs rattacher à la première, sera constituée par les aciers pour projectiles.

Aux premiers aciers, réservés à la construction de machines, d'automobiles, d'avions, de charpentes, etc., on demandera :

a) Une grande ductibilité, car il est préférable qu'une sollicitation exagérée provoque une déformation qui avertit, plutôt qu'une rupture immédiate;

b) Une grande sensibilité aux traitements thermiques; ceux-ci doivent agir sur les propriétés physiques de l'acier dans la mesure la plus large possible. Ainsi, une pièce de machine, généralement travaillée par les machines-outils, doit pouvoir être rendue aussi douce que possible pour ce travail, mais après cela il faut qu'il soit possible de lui rendre ou de lui donner la ténacité et la dureté qu'exige l'emploi pour lequel elle est réservée;

c) Enfin, et ce ci les distingue surtout des aciers à outils, une uniformité presque absolue de ses propriétés physiques et chimiques. Un défaut de la barre d'où sont tirés de multiples outils ne provoque que le rejet d'un seul outil; pareil défaut dans une pièce de construction suffit pour la faire rejeter, elle et ses pareilles.

1. — Envisagés au même point de vue de leur utilisation, les aciers de construction peuvent se ranger eux-mêmes en plusieurs classes :

A) Aciers pour la construction mécanique, qui sont surtout ceux visés par les considérations précédentes et dont nous donnerons plus loin les subdivisions;

B) Aciers pour la construction métallique;

C) Aciers utilisés pour constructions spéciales, comprenant :

1° Aciers ayant des propriétés électriques ou magnétiques, comprenant . . .	}	Les aciers pour aimants; Les aciers pour tôles d'induit; Les aciers non magnétiques; Les aciers pour résistances électriques;
---	---	--

2° Aciers à grande limite élastique — pour ressorts;

3° Aciers à grande résistance aux agents d'oxydation et aux acides;

4° Aciers à faible coefficient de dilatation;

5° Aciers joignant à une grande résistance à l'usure une grande ténacité;

6° Aciers pour cylindres de laminoirs;

7° Aciers pour billes et roulements.

2. — Les aciers à outils se divisent en :

A) Aciers pour outils de coupe, comprenant :

1° Aciers pour outils à grande vitesse — aciers rapides;

2° Aciers pour outils travaillant les substances très dures;

3° Aciers pour outils travaillant les métaux à moyenne et faible vitesse ou encore pour les substances relativement peu dures;

4° Aciers pour coutellerie et taillanderie;

5° Aciers qui ne doivent subir qu'un faible retrait à la trempe;

B) Aciers pour outils soumis aux chocs ou aux fortes pressions;

C) Aciers pour outils devant résister à l'usure (filières);

D) Aciers pour matrices, étampes, mandrins (exigences multiples);

E) Aciers pour limes.

II. — Production.

Les aciers fins sont produits presque exclusivement au four électrique, au four à creusets et au four Martin.

Toutefois, Krupp et la Bochumer Verein produisent pour les fabriques d'outils et particulièrement pour celles de limes de Remscheid, de l'acier Bessemer dont ils soignent d'ailleurs particulièrement la pureté des charges.

Quant au convertisseur Thomas, sa fabrication est destinée à l'ensemble des emplois pour lesquels suffit un matériel bon marché : c'est le grand producteur d'acier ordinaire.

Signalons que le four à puddler est encore utilisé par Dörrenberg pour la production de métal soudant et pour préparer la matière première de son aciérie à creusets.

A. — Fours électriques.

PROCÉDÉ : Dans le processus complet, deux grandes phases sont toujours à distinguer : la fusion et le finissage (désoxydation et désulfuration). De cette dernière période, on peut aussi distinguer les additions.

1° Fusion. (Durée de cette période : 3 à 4 heures.)

Elle a lieu :

a) Sans oxydation pour les aciers de grande valeur et dont les matières premières sont de premier choix (particulièrement à très faible teneur en P et S (moins de 0,02 %)). La scorie est constituée

par un peu de calcaire répandu sur la sole du four. Par suite du peu d'oxydes de la charge, leur réduction est immédiate et la scorie devient rapidement blanche.

b) Avec oxydation partielle pour les aciers de bonne qualité. La charge est constituée de ferraille de moins bonne qualité, mais non rouillée. On introduit aussi du calcaire comme ci-dessus, mais en plus grande quantité (300 k. pour une charge de 7 tonnes). La désoxydation se fait en partie par le C de la charge, en partie par la deuxième scorie (voir ci-après).

c) Avec oxydation complète. Cette méthode permet l'utilisation d'une mauvaise ferraille, ainsi que la réduction du C, Si, Mn, P, aussi loin qu'on le désire. La teneur en S est aussi diminuée. L'oxydation est activée en ajoutant du minerai ou des ferrailles minces très oxydées. La scorie est constituée comme ci-dessus. La température est maintenue assez haute pour faciliter l'oxydation.

Dans les deux derniers cas (travail avec oxydation), la scorie d'oxydation est enlevée à la fin de cette période. Dans le cas d'oxydation complète, on procède alors à une recarburation du bain (souvent avec des déchets d'électrodes) avant d'entreprendre le finissage proprement dit. Il en résulte un dégagement tumultueux de gaz (CO) que l'on calme par le ferrosilicium. Cette dernière méthode de travail exige un temps plus considérable.

En résumé, pour les aciers de grande valeur, on réalise la fusion sans oxydation avec des charges aussi pures que possible. Mais le procédé général est la fusion avec oxydation donnant un fer très doux que l'on amène à la nuance désirée par additions (voir plus loin).

2° Finissage.

Il peut se faire à l'aide :

a) *D'une scorie à base de chaux.* On introduit un mélange composé de 10 parties de chaux, 1 de fluorine, 1 de poussier de coke, et donnant une scorie servant avant tout à couvrir le métal. Pour donner de la fluidité à la scorie, la fluorine est préférée au sable. Elle ne diminue pas, en effet, la teneur en base et, de plus, elle favorise la désulfuration. L'oxyde et le silicate du bain se séparent plutôt par l'action mécanique que par l'action chimique et montent à la surface se perdre dans la scorie. Le peu de Ca C₂ qui se forme est réduit par les oxydes de la scorie. Toutefois, la réduction de cette faible quantité de carbure est accompagnée d'un

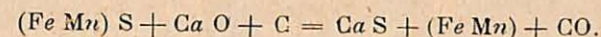
dégagement très lent et, par suite, très long de gaz (le liquide n'est pas encore tranquille après 3 ou 4 heures). Il en résulte la nécessité d'achever la désoxydation avec du ferrosilicium et de l'aluminium, ce qui présente l'inconvénient de donner de petites inclusions de scories.

Par contre, le procédé a l'avantage de donner un métal qui n'emprunte pas de C à la scorie et par conséquent peut être aussi doux qu'on le désire;

b) *D'une scorie carburée.* On ajoute 7 % du poids de métal, d'un mélange de 6 parties de chaux, 1 de fluorine et 2 de poussier de coke. Il se produit du Ca C₂.

Après 30 à 45 minutes, la scorie devient blanche (la couleur foncée provenait des oxydes métalliques qui sont réduits peu à peu); la désoxydation est terminée.

Commence alors la désulfuration. On ajoute les ferros et une faible quantité du mélange ci-dessus. Le C réduit la chaux et libère le Ca qui se combine au S pour donner Ca S suivant l'équation :



Ca S passe dans la scorie ou s'échappe à l'état gazeux.

Le bain devient tranquille après une heure. Le ferro-silicium est alors ajouté et la coulée se fait 15 à 20 minutes après cette addition.

L'inconvénient principal du procédé est la carburation du métal par la scorie.

A remarquer que l'action désoxydante de la scorie carburée est de beaucoup diminuée par l'oxygène de l'air. Il faudrait donc empêcher l'accès de l'air. Mais, par contre, la désulfuration s'accomplirait mal dans ces conditions.

Toutes choses égales, on ne réussit à faire disparaître que 30 % du S en gardant les portes du four fermées, alors qu'en les gardant ouvertes, on peut aller jusqu'à 80 % (le Ca S ne peut plus s'échapper dans le premier cas et sa concentration dans la scorie est limitée).

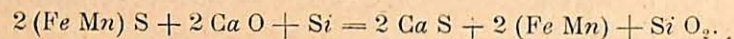
Pratiquement, pour arriver à une désoxydation et désulfuration complètes, on utilise une scorie carburée comme il est dit plus haut, on tient les portes fermées, mais on renouvelle fréquemment les additions du mélange qui donne naissance à la scorie.

3° Additions.

La teneur en *C* est augmentée en ajoutant au bain des ferros des débris d'électrodes ou de fontes pures (plus rarement).

Le *Ni* est introduit sous forme métallique ou en riblons, dès que les pertes en oxydation sont devenues impossibles.

Le *ferro-silicium*. La moitié s'ajoute quand la scorie est devenue blanche. Le *ferro-silicium* aide alors à la désulfuration, suivant :



L'autre moitié est introduite 15 minutes avant la coulée.

Le *ferro-chrome* (ne pas l'employer à l'état pulvérulent) s'ajoute 1/2 heure après l'apparition de la scorie blanche.

Le *ferro-manganèse* s'emploie dès la formation de la scorie blanche (fin de la désoxydation). Le *Mn* n'agit pas directement comme agent de désulfuration. Mais d'après Howe, un métal retient mieux en solution ses propres sulfures que les sulfures des métaux étrangers. Le *Mn*, qui s'unit au *S*, le mène donc plus aisément que le fer à la scorie où il passe à l'état de *CaS*.

Le *ferro-vanadium* est ajouté de 15 à 20 minutes avant la coulée. Le *ferro-tungstène*, 5 à 10 minutes avant la coulée.

Le procédé tel que nous venons de le décrire n'est d'ailleurs pas général. Au contraire, bien souvent la première phase (fusion avec oxydation) est réalisée au four Martin ou au Bessemer, le finissage seul se fait au four électrique.

La fusion demande, en effet, une très grande dépense d'énergie électrique. Le four Martin basculant de grande capacité jouant le rôle de mélangeur (Aciérie Becker) ou la cornue Bessemer (Aciérie Werner) se prêtent particulièrement bien à ce procédé.

La fabrication ne se pratique plus guère au four électrique seul, que lorsqu'on utilise des riblons très riches en métaux facilement oxydables ou des aciers à très forte teneur en éléments étrangers comme les aciers rapides.

Fours utilisés : Deux grandes catégories :

a) Fours à arc genre Héroult (Böhler, Lindenberg, Krieger, Werner, Becker).

Krefelder Stahlwerke utilise le four Nathasius, variante du Héroult;

b) Fours à induction Röchling Rodenhauser (Becker et Bergische Stahl Industrie). Ces fours ne permettent que le finissage. Les deux usines précédentes donnent comme raison de l'emploi de ces fours la sécurité contre une carburation du bain toujours possible par les électrodes ou leurs débris dans les fours Héroult.

Pour les détails descriptifs, voir Hütte, page 567 et suivante.

On peut signaler comme avantages du four électrique :

1) Le réglage facile de la température et la possibilité d'atteindre des températures élevées. D'où son utilisation pour les moules à parois minces (Werner, Krieger, Bergische Stahl Industrie);

2) Comparé au Martin et au Bessemer, il permet de supprimer l'action des gaz et de l'air (oxydation, sulfuration, dissolution de gaz);

3) Comparé au four à creusets, il permet un contrôle chimique aussi fréquent qu'on le veut, donne une plus grande homogénéité à la charge, une désoxydation complète. Il permet l'utilisation de matières moins pures et surtout il est moins coûteux;

4) Enfin, et c'est sans doute là une des grandes causes de l'extension de l'emploi du four électrique, il permet, mieux que tout autre procédé, d'obtenir un bon acier en partant d'une matière première de qualité douteuse, qui exige une oxydation préalable durant la première période : cette oxydation peut d'ailleurs s'accomplir aussi bien au four Martin suivant la tendance actuelle, bien qu'on risque d'introduire ainsi des éléments nocifs dans le bain.

Mais, alors que la désoxydation au four Martin n'est jamais complète et exige des additions génératrices d'inclusions de scories, elle peut être poussée aussi loin qu'on le veut au four électrique.

B. — Acier au creuset.

PROCESSUS : Il faut distinguer :

1° L'épuration, séparation purement *mécanique* de la scorie qui, par suite de sa densité relativement faible et de la fluidité du bain, monte à la surface. Cette scorie peut provenir d'inclusions dans les constituants de la charge; elle peut aussi s'être formée par l'action de la silice contenue dans l'argile du creuset sur les oxydes dissous dans le bain.

(Ces oxydes peuvent d'ailleurs aussi être réduits par le C du métal ou du creuset : il se produit alors un léger dégagement gazeux qui cause un faible bouillonnement favorable au dégagement de la scorie.)

La scorie ainsi formée, très riche en oxyde de fer, est réduite par le C du creuset et s'enrichit en silice. Elle devient alors sans action sur le métal ;

2° L'ensemble des réactions chimiques connues sous le nom de réactions du creuset.

a) *Carbone*. Si la teneur en C du creuset dépasse 30 % et si la charge contient plus de 0,3 % de Mn, le C du creuset passe dans le métal en quantité d'autant plus grande que le creuset contient plus de C, que la charge renferme plus de Mn et que la fusion dure plus longtemps.

Si on veut que la teneur en C du métal reste constante, la charge ne peut contenir plus de 0,2 % de Mn.

L'augmentation de teneur en C du métal est de 0,2 à 0,3 %, quand le creuset contient de 40 à 45 % de C, que la charge comprend 0,3 à 0,4 % de Mn et que la durée de fusion est de 6 heures.

Dans les creusets ayant moins de 20 % de C, la diminution de teneur en C du métal est d'autant plus forte que la charge est plus riche en C.

b) *Mn et Si*. — Le Si du creuset passe dans le métal suivant la réaction : $2 Mn + Si O_2 = Mn O + Si$. Plus la teneur de la charge en Mn est forte et plus le Si passe dans le bain. L'augmentation de la teneur du bain en Si est d'ailleurs d'autant plus forte que le creuset contient plus de carbone. (Pour une teneur de 0,3 % en Mn de la charge, l'augmentation en Si passe de 0,11 % pour les creusets en argile pure, à 0,4 % pour les creusets à 45 % C.)

Une teneur d'au moins 0,25 % Si est à conseiller, sinon on obtient rarement un acier sans soufflures.

c) Le S du creuset passe entièrement dans le métal.

d) Les teneurs des autres éléments restent ce qu'elles étaient dans la charge.

CREUSSETS. — Les creusets sont constitués d'un mélange de graphite, d'argile et de chamotte. On y ajoute parfois aussi du coke, du charbon de bois, de la sciure de bois et des déchets de creusets ayant servi.

Généralement, il entre dans le mélange environ 50 % de graphite, de coke et autres produits à base de C et 50 % d'argile et de chamotte. Ex. de composition :

48 % de graphite de Styrie, 22 % d'argile, 30 % de chamotte ;

50 % de graphite de Styrie, 50 % d'argile ;

41 % de graphite de Ceylan, 23 % de chamotte, 30 % d'argile, 6 % de coke.

Le graphite est séché à 40° environ et finement pulvérisé, l'argile également. La chamotte, qui est de l'argile portée à 1100-1400°, est aussi pulvérisée.

Les matières premières sont alors mélangées à sec dans des tambours. Le mélange est ensuite additionné d'eau, malaxé et livré sous forme de cylindre continu, par une filière, dans laquelle la pâte est pressée par une vis sans fin (dispositif analogue à celui utilisé pour la fabrication des briques par le procédé humide).

Une presse donne finalement au creuset sa forme.

Les creusets sont ensuite soumis à un séchage de 6 à 8 semaines, la température augmentant de 10° chaque semaine.

MATIÈRES PREMIÈRES. — Certaines aciéries comme Böhler emploient comme matière première de choix un acier fortement carburé (0,8 à 1,3 % C avec des teneurs en Mn et Si inférieures à 0,04 %) obtenu par affinage au charbon de bois de la fonte.

Rheinmetall travaille avec du fer de Suède.

D'autres (Dorrenberg) se servent d'acier puddlé.

Enfin, la plupart des aciéries à creusets (Böhler, Dorrenberg, Rheinmetall, Rudolf Schmidt) alimentent leurs creusets avec de l'acier Martin contenant 1 % de C environ.

A l'heure actuelle, il y aurait une tendance à faire passer l'acier Martin liquide dans les creusets. Le procédé est cependant peu, sinon pas du tout, employé dans les usines du secteur.

Pour carburer, on utilise des fontes et des ferros généralement au charbon de bois, dont on a trié les matières premières de façon à ne pas introduire d'éléments indésirables. Ces fontes coulées dans l'eau sont sous une forme grenue qui facilite le dosage.

FOURS. — Les grandes aciéries (Böhler, Rheinmetall) utilisent des fours à gaz à récupération, genre four Martin.

Les petites aciéries (Bleckmann, R. Schmidt) ont des fours au coke très simples, les quelques creusets étant enfouis dans le coke.

Ces fours sont peu économiques et ne peuvent plus guère être utilisés que pour des aciers très coûteux comme les aciers rapides.

La plupart des aciéries n'utilisent leurs creusets qu'une fois sous la raison que la « réaction du creuset » est différente suivant la teneur en C du creuset qui varie naturellement après usage.

Rudolf Schmidt les utilise cependant 6 fois.

Chaque four de fusion a son four à réchauffer qui a parfois, comme chez Böhler, deux compartiments. Les creusets vides sont chauffés dans la première partie de ce four (parfois seule existante) à environ 500°. Ils reçoivent alors la charge (en moyenne 35 k.) et passent dans la deuxième chambre du four à réchauffer qui est chauffée directement.

COULÉE. — Les creusets sont généralement vidés dans une poche de coulée pour donner aux aciers plus d'homogénéité.

Le grand avantage de la production au creuset, c'est que la fusion du métal s'y fait sans absorption de gaz (mieux encore que dans le four électrique) et qu'après cette fusion, la désoxydation est continuée par la réaction au creuset.

De plus, fusion et réaction s'accomplissent dans le creuset d'une façon beaucoup plus calme et on a donc moins à craindre que la scorie reste mélangée au métal.

Enfin, pour les aciers à prix élevés dont on ne demande souvent que de petites quantités, la faible capacité des creusets permet une production en rapport avec la demande.

Ce procédé a le grand inconvénient de coûter très cher.

C. — Acier Martin.

Comparé aux procédés Thomas et Bessemer, le procédé Martin présente entre autres avantages celui de mieux se prêter à la préparation d'un acier de qualité; en effet :

- 1) L'évolution du métal peut être suivie et contrôlée par des essais d'aussi près qu'on le veut;
- 2) La durée de l'opération permet de limiter au minimum les excès de réactifs;
- 3) Cette même durée est favorable au dégagement complet des oxydes et impuretés.

Vis-à-vis des fours électriques et à creusets, il présente le grave inconvénient d'exposer l'acier à l'action des gaz et particulièrement de l'oxygène, et de mal se prêter à la désoxydation.

La méthode acide, autrefois réservée aux aciers fins ou de moulage, est supplantée aujourd'hui, même pour ces fabrications, par la méthode basique, plus rapide, permettant le traitement de charges moins pures et donnant des produits de qualité sensiblement équivalente. Elle est la seule possible pour la production d'aciers doux, car l'oxydation prolongée que cette fabrication demande provoque la formation de Fe O qui attaque les parois du four acide.

Le seul avantage que l'on puisse peut-être encore concéder aux fours acides, c'est celui de donner un métal plus compact (à cause du Si).

MARCHE DU FOUR MARTIN BASIQUE. — Le procédé aux ferrailles est le seul utilisé dans les usines du secteur.

Cette méthode est suffisamment connue. S'y succèdent fusion et affinage (décarburation, déphosphoration, désulfuration), désoxydation et additions finales.

Un décrassage est nécessaire après l'affinage dans le cas d'utilisation de charges phosphoreuses. La décarburation n'est généralement pas complète pour les aciers durs.

A part cette remarque, la fabrication des divers aciers ne diffère guère que par les additions finales.

a) *Aciers doux*. — On procède à une addition légère de lavage au ferro-silicium après décrassage ($< 0,1$ % de la charge). La désoxydation se fait alors au ferro-manganèse, le Si rendant l'acier plus dur.

Par contre, dans la fabrication d'aciers de qualité, il est à conseiller d'ajouter du ferro-silicium riche dans le chenal et de l'aluminium dans la poche de coulée. Les aciers doux se solidifient, en effet, rapidement : le silicium lui donne plus de fluidité et l'aluminium agit dans le même sens en augmentant la température par sa combustion; ainsi le dégagement des gaz dissous n'est pas arrêté par une solidification trop rapide.

Pour les aciers au C de cémentation ($C < 0,12$), l'aluminium est proscrit, mais on augmente la proportion de Si pour obtenir une désoxydation complète.

b) *Aciers durs*. — On désoxyde dans ce cas au ferro-silicium qui donne un métal plus fluide, mais il est bon de se contenter des ferros moins riches en Si pour éviter une trop forte élévation de la température et la tendance aux tapures et aux criques qui en est la conséquence.

D. — Acier Puddlé.

Les environs de Remscheid et de Solingen ont beaucoup fabriqué autrefois l'acier dit « raffiné ». La fonte était transformée en fer au four à puddler, les barres de fer étaient alors cémentées, de façon à porter la teneur en C à 0,8 à 1,5 %.

Réunies en paquet, on les soudait ensuite par forgeage. (L'acier de Damas avait une fabrication analogue.)

Le seul survivant de ces fabricants d'acier est Dörrenberg, à Runderoth, qui opère d'ailleurs d'une façon légèrement différente. La fonte soufflée froide du Siegerland (plus pure) est traitée au four à puddler, mais on arrête la décarburation avant qu'elle soit terminée. L'acier puddlé ainsi obtenu est forgé en barres plates qui sont classées en paquets suivant leur teneur en C.

Cette classification se fait par le seul examen de la cassure. Les paquets sont ensuite soudés par forgeage.

Ces aciers sont encore utilisés pour la fabrication des haches, couteaux de fortes dimensions, etc. L'acier Bessemer leur fait cependant une concurrence qui amènera fatalement leur disparition.

III. — Traitement physique des aciers.

A. — Coulée.

La qualité d'un acier provenant du four peut être, pendant la coulée, affectée par un des défauts suivants :

- 1) Les inclusions de scories;
- 2) Les soufflures;
- 3) Les retassures;
- 4) Les ségrégations;
- 5) Une mauvaise cristallisation.

On peut y remédier par divers procédés qu'on peut classer en :

- a) procédés chimiques;
- b) méthodes de coulée;
- c) procédés mécaniques.

a) *Procédés chimiques.* — Ce sont les additions déjà signalées de ferros, d'aluminium, de vanadium. Le vanadium est réservé aux aciers de prix (aciers rapides et aciers pour la construction mécanique).

Ces additions, dont le rôle est basé sur leur affinité pour l'oxygène, donnent des aciers sans soufflures. Mais elles ne sont pas sans inconvénient, car les produits de désoxydation (surtout Si O₂) peuvent donner à l'acier une grande fragilité. De plus, l'excès d'additions nécessaires à la sécurité de la désoxydation peut amener des modifications de composition peu désirables, surtout lorsqu'il s'agit d'aciers fins.

b) *Procédés de coulée.*

1. Verser l'acier très chaud dans la poche, de façon à y permettre une séparation aisée de la scorie par suite de la fluidité du métal.

Laisser ensuite refroidir le bain dans la poche et ne couler dans les lingotières qu'aussi tard que possible : la lingotière s'échauffant moins, le refroidissement et la solidification de l'acier se fait plus rapidement : il en résulte une homogénéité plus grande du métal (diminution des retassures, des ségrégations et du grain).

2. Couler les lingots lentement dans des lingotières aussi lourdes que possible. (L'Ermag, à Eschweiler, coule des lingots de 100 k. dans des lingotières 5 fois plus lourdes.) Ces précautions favorisent également une solidification rapide et l'homogénéité qui en est la conséquence.

3. Maintenir la partie du lingot qui se solidifie la dernière aussi chaude que possible. On y arrive, soit en lui donnant un revêtement réfractaire (toujours utilisé pour les aciers rapides), soit en la réchauffant par un petit feu portatif, soit aussi en donnant au lingot une forme appropriée (lingots de Böhrer dont la section circulaire s'élargit et passe à la forme carrée).

c) *Procédés mécaniques.* — Ils consistent à exercer durant la solidification, une compression du lingot limitant les retassures. Le Rheinmetall utilise, assez rarement toutefois, pour son acier à creusets, le procédé Harmet qui donne cependant de bons résultats.

Mars indique le traitement suivant comme étant le mieux approprié à la production d'un métal sain :

On dispose d'une poche de coulée cylindrique, de faible diamètre, mais assez haute. Le métal peut y être rapidement réchauffé par des courants d'induction.

Le métal est versé dans la poche à la température te (fig. 1); on l'y maintient pendant ab pour favoriser la séparation de scorie. On le laisse ensuite se refroidir et se solidifier suivant bc

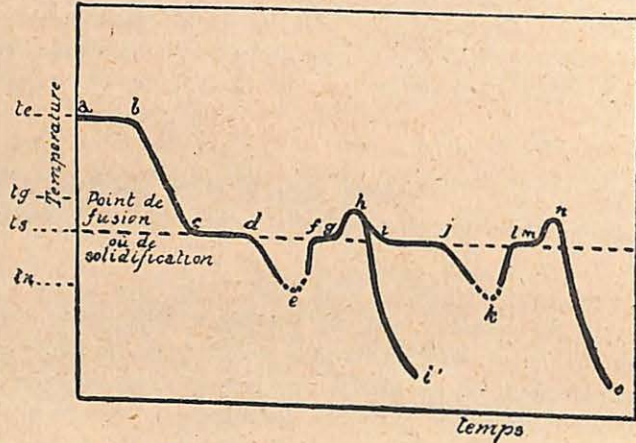


Fig. 1 TRAITEMENT THERMIQUE DE L'ACIER LIQUIDE POUR L'OBTENTION DE BLOCS COMPACTS.

et cd . Les gaz dissous se séparent. Une partie s'échappe, l'autre partie reste sous forme de souffres dans le métal. Si, une fois la solidification finie et le métal refroidi à tn , on réchauffe rapidement suivant $efgh$, les gaz inclus dans le métal s'échappent dès que celui-ci se liquéfie et, comme l'échauffement est rapide, il se dissout peu de nouveaux gaz. Le métal est ensuite coulé suivant hi ou bien on peut procéder à une nouvelle solidification dans la poche pour provoquer une nouvelle séparation de gaz (suivant $hijk$) suivie d'un réchauffement ($klmn$).

Le procédé n'est cependant utilisé par aucune aciérie du secteur.

Il est à noter que toutes les aciéries spéciales effectuent une vérification de tous leurs lingots. A cet effet, ceux-ci sont recuits, puis on enlève au tour la couche extérieure de façon à faire apparaître les criques, fissures et autres défauts. Si ceux-ci sont peu importants, ils sont enlevés au ciseau pneumatique. Le recuit n'a d'autre but que de rendre plus douce la couche à travailler.

B. — Forgeage et Laminage.

Ils ont pour but d'améliorer les défauts de coulée.
Règles pratiques.

1. *Choix de la température.* — Le forgeage ne peut s'exécuter que lorsque l'acier est à une température plus élevée que celle de son point de transformation solide et se trouve par suite à l'état de solution solide dont les particules ont une mobilité relativement beaucoup plus grande que les cristaux dont est constitué l'acier sous la température de transformation.

Cette mobilité augmentant avec la température, il semblerait avantageux de ne forger qu'à très haute température, mais on obtiendrait alors un métal où le grain aurait pu se développer considérablement et ayant ainsi de faibles caractéristiques mécaniques. On aboutit donc à la règle suivante : le forgeage est commencé à haute température, mais il se continue durant le refroidissement jusqu'immédiatement au-dessus de la température de transformation. De cette façon, la division du grain réalisée par le travail mécanique n'est pas contrebalancée par l'accroissement que ne manque pas de produire l'action d'une haute température, action qui se prolonge d'autant plus longtemps que le forgeage est terminé à une température plus élevée. Il faut autant que possible terminer le forgeage en une chauffe, car les chauffes successives provoquent un accroissement du grain que ne compense pas le forgeage.

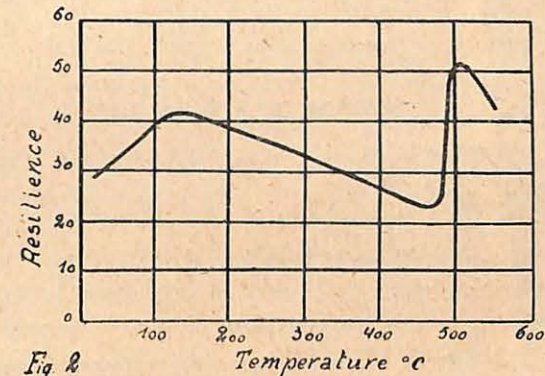


Fig. 2 RELATION ENTRE RESILIENCE ET TEMPERATURE D'UN ACIER A OUTIL A 1,12 % DE CARBONE. D'APRES GUILLET ET REVILLON

Toutefois, exception est généralement faite pour les aciers rapides où l'on obtient toujours un grain suffisamment fin et qui ne se laissent bien travailler qu'à température élevée. Le forgeage à basse température provoque une fragilité qui est surtout sensible quand on abaisse la température de forgeage vers 400 à 300°.

Le diagramme (2) de Guillet et Revillon donne la variation de la résistance au choc d'un acier à 1,12 % C avec la température.

La température de transformation variant d'un acier à l'autre, la limite inférieure de la température du forgeage variera avec chaque acier. Pour les aciers au C, les températures de transformations sont données par la figure 3.

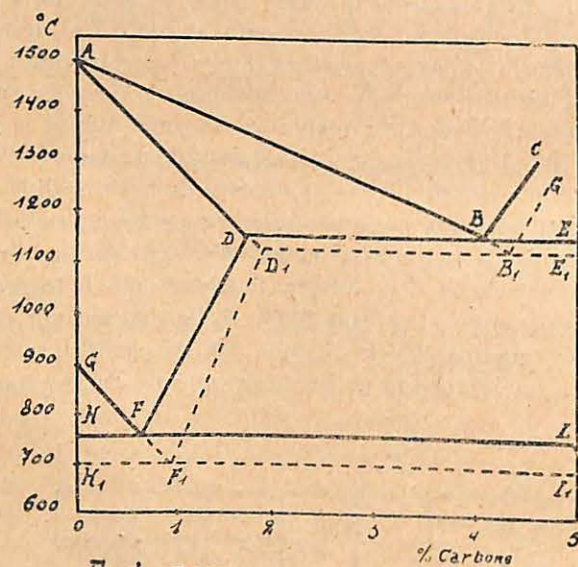


Fig. 3 DIAGRAMME DU FER-CARBONE

2. Le forgeage partant d'un lingot rond pour arriver à une barre ronde, ne peut se faire qu'en passant par des sections intermédiaires aplaties, sinon il se forme un vide à l'intérieur de la barre. Il s'agit probablement là d'une action analogue à celle du Schrägwalzwerk (Laminoir oblique) Mannesmann, le lingot ou la barre étant aussi soumis à une rotation durant le forgeage.

3. Il faut éviter le forgeage avec des marteaux trop légers : l'extérieur du métal seul est alors travaillé et il se produit des tensions qui peuvent provoquer la rupture entre les deux zones.

Forgeage ou laminage?

Les producteurs d'aciers fins n'hésitent pas à utiliser le forgeage malgré son prix élevé, pour la fabrication des barres en aciers de prix. Les raisons ci-dessous expliquent mal ce que, d'après eux, l'expérience prouve à souhait : l'acier forgé se comporte mieux que l'acier laminé.

A l'Acierie Becker particulièrement, on a cité l'exemple de pièces primitivement forgées, remplacées par des pièces laminées beaucoup moins coûteuses, mais qu'il fallut abandonner tant elles résistaient mal.

Le forgeage produit peut-être un enchevêtrement des cristaux que ne peut réaliser le laminage, enchevêtrement qui augmente l'étendue de leurs surfaces d'adhésion. Peut-être aussi le forgeage peut-il donner une densité plus forte du métal?

C. — Travail à froid.

C'est le travail du métal à une température inférieure à celle de la transformation.

Il a pour effet de modifier les caractéristiques du métal, particulièrement d'augmenter les R_r (résistance à la rupture) et R_e (limite d'élasticité). L'explication suivante (Mars) est assez plausible.

On admet que la cohésion des cristaux constitutifs est plus grande que leur adhésion. La rupture d'un métal ne peut donc se produire que suivant une surface de séparation de ces cristaux. Cette surface sera d'autant plus irrégulière, et par suite plus étendue, que les cristaux constitutifs seront plus petits. Et, comme l'adhérence est fonction de la grandeur de cette surface, elle sera aussi plus difficile à vaincre quand les cristaux seront petits.

Or, le travail à froid provoque un glissement et un morcellement des cristaux, morcellement que les considérations ci-dessus montrent générateur d'une augmentation de résistance.

Goerens a étiré à l'extrême un fil de fer doux de 5^{mm},2 de diamètre.

La solubilité du fil étiré, dans H_2SO_4 , est de 603 % de celle du fil primitif.

Sa force coërcitive	423
Sa limite élastique	315
Sa Rr	359
Sa dureté (à la bille)	192
Son allongement	17

IV. — Traitement thermique.

A. — Recuit.

Il peut avoir pour objet de :

- 1) *diminuer la grosseur du grain.* C'est le recuit qu'on applique aux pièces moulées (fig. 4).

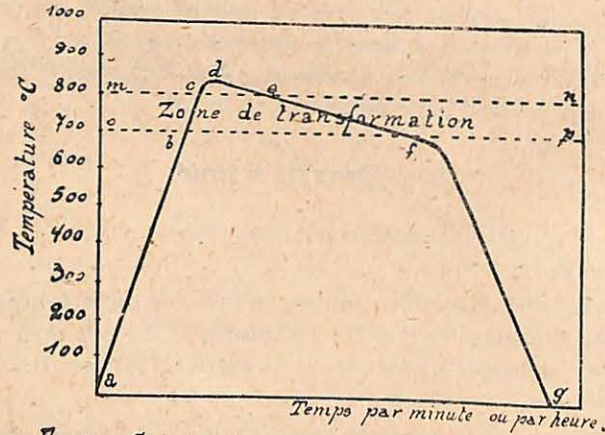


Fig. 4 COURBE NORMALE DE CHAUFFE POUR LA DIVISION DU GRAIN ET LE RECUIT DE L'ACIER

En *b* commence la transformation de la perlite et de la ferrite (ou cémentine) en austénite. Cette transformation est terminée en *c* : les cristaux d'austénite qui viennent de se former avec les débris des cristaux primitifs ont des dimensions très réduites. Plus on dépasse la température de *C* ou plus on augmente la durée du séjour de la pièce au-dessus de cette température, et plus les dimensions des grains du métal augmentent (lois de Sauveur) ;

2) *augmenter la grosseur du grain.* Le traitement est sensiblement le même que ci-dessus. Cependant, comme il s'agit ici d'augmenter le grain, il y a avantage à maintenir l'acier plus longtemps au-dessus de la zone de transformation.

Ce recuit a pour but de ramener l'acier à son état normal après la trempe, le travail à froid ou même le forgeage. Ces traitements amènent non seulement une division du grain, mais une grande

partie de l'énergie dépensée reste dans le métal sous forme latente et il en résulte une fragilité, une instabilité qu'on peut comparer à celle des corps endothermiques. Il existe dans l'acier des tensions dont il est libéré par le recuit.

Ce recuit peut aussi avoir pour raison de rendre l'acier plus doux.

On verra, en effet, plus loin (trempe) qu'à égalité de constituants un acier est d'autant plus dur que son grain est plus fin.

C'est ainsi que le recuit des lingots dont il a été question ci-dessus a pour but de diminuer la dureté de la couche extérieure que le contact avec la paroi froide de la lingotière avait trop brusquement refroidie et par suite durcie.

Les températures de recuit des aciers au C se déterminent aisément par la considération du diagramme (fig. 3). Le refroidissement se fait dans le four même dont on laisse tomber doucement la température jusqu'à 2 ou 300° (cela peut durer une semaine pour des pièces un peu grosses).

Afin d'éviter ce refroidissement du four, Wermer se dispose à établir un sorte de four continu dans lequel les pièces se déplaceraient et où la température irait en s'abaissant graduellement dans le sens du mouvement des objets.

Recuit défectueux.

a) Si l'acier est porté à une température trop élevée ou s'il est maintenu trop longtemps à une température immédiatement au-dessus de la zone de transformation (fig. 5), les dimensions du

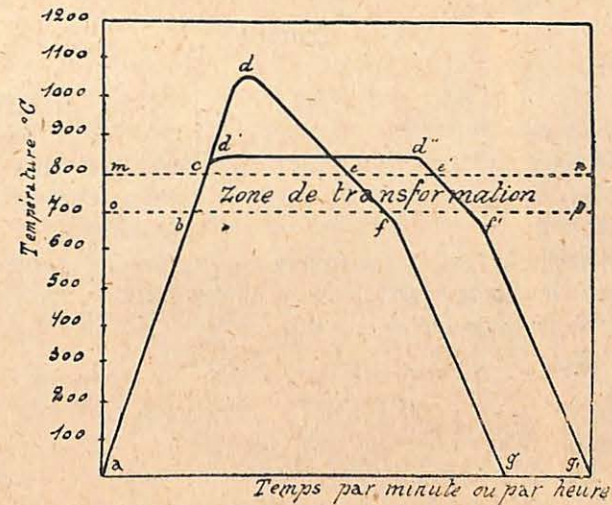


Fig 5. COURBES DE L'ACIER SURCHAUFFE

grain s'accroissent tellement que les propriétés de l'acier en sont fortement affectées.

L'acier est dit surchauffé.

Un nouveau forgeage est nécessaire pour faire disparaître ce grain défectueux.

b) Si la température est encore plus élevée (1200°), l'acier commence à brûler, il se forme entre les cristaux des produits d'oxygénation qui rendent l'acier inutilisable. L'acier brûlé ne peut d'ailleurs pas être régénéré.

Fours à recuire. — Ce sont généralement des fosses allongées (pour barres d'acier) profondes d'environ 1 mètre.

Ils sont très souvent chauffés au gaz de gazogènes. Mais il y a aussi des fours à halbgas et au lignite pulvérisé.

Pour les fils, on utilise les fours dits à pot de tréfilerie.

Pour éviter la décarburation superficielle, les aciers sont placés dans des tubes, des caisses ou des cuves (fils) en fonte ou en acier moulé, ou même pour de petits objets dans des tubes que l'on clot hermétiquement, et à l'entrée des tubes ou des caisses, on introduit soit du poussier de coke, soit du charbon de bois.

Les fours où se fait le recuit des lingots sont souvent installés comme les fours à réchauffer ordinaires, mais la sole est montée sur essieux et peut sortir du four. La décarburation a moins d'importance pour les lingots; au contraire, elle est favorable à l'enlèvement de la couche extérieure.

B. — Trempe.

La trempe d'un acier consiste à le porter à une température au-dessus de celle de transformation et à faire suivre cette élévation de température d'un refroidissement suffisamment rapide pour que le métal conserve à la température ordinaire la constitution dont l'état stable est au-dessus de la zone de transformation.

Généralement le but de la trempe est d'obtenir la dureté de l'acier. Or, les divers constituants de l'acier au C se rangent au point de vue de la dureté comme suit :

Constituants	Teneur en C	Dureté
Ferrite.		1
Perlite.	0,13 à 1,52 % C	1,8 à 10,3
Sorbite	0,48 à 0,58 »	5,2 à 53,6
Troostite	0,58 »	88,2
Martensite	0,2 à 1,52 »	38,9 à 261,6
Austénite	3,24 »	103,4
Cémentite.	3,24 »	272,8

On voit tout l'intérêt qu'il y a à obtenir soit de la martensite, soit un mélange de martensite et de cémentite. Mais cela ne suffit pas. Une chaîne dont tous les maillons ont tous une même résistance moyenne se comporte mieux qu'une autre chaîne dont quelques maillons ont une très grande résistance, les autres étant beaucoup plus faibles. De même un métal dont la cémentite se trouvera en cristaux volumineux dans une masse de perlite, aura moins de résistance à la pénétration, donc une dureté moindre, qu'un acier où la cémentite serait très divisée (théorie de Le Chatelier).

Le moyen d'obtenir cette cémentite très divisée est de porter le métal à une température telle que ce constituant commence à passer dans la solution solide et de figer ce mélange de fines particules de ferrite et de cémentite par la trempe.

Il faudra donc tremper au-dessus de DFG pour les aciers au carbone (fig. 6).

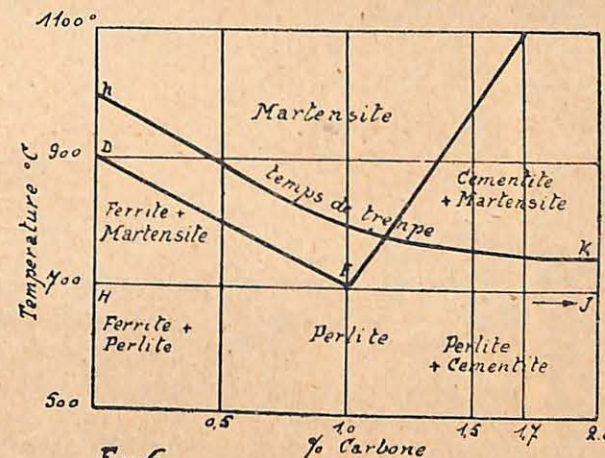


Fig. 6.

Il importe même de dépasser légèrement cette température pour les raisons suivantes :

1° Particulièrement pour les grosses pièces, la température ne s'établit pas uniformément;

2° La transformation des constituants de l'acier exige un certain temps;

3° La vitesse du refroidissement par la trempe va d'abord en augmentant (fig. 7). En chauffant la pièce au-dessus de la température de transformation, la vitesse de refroidissement est maximum au moment de la transformation.

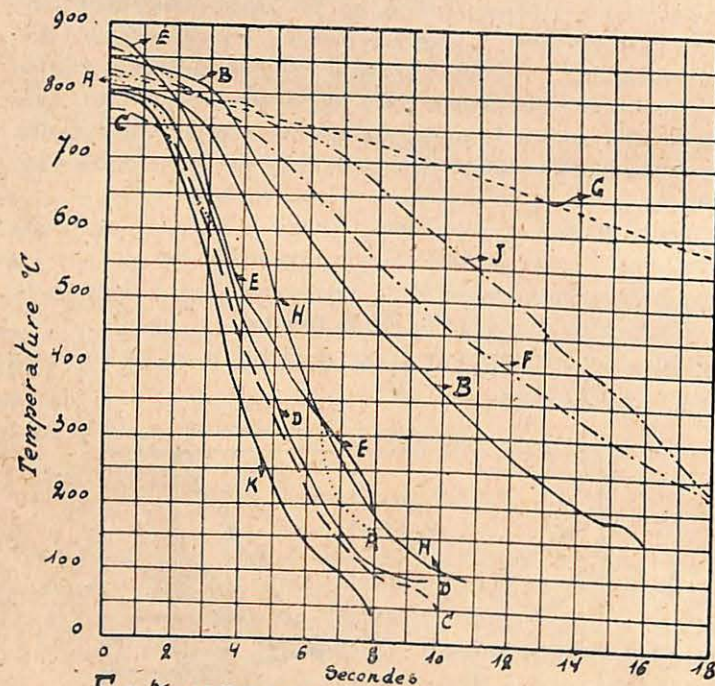


Fig. 7 EFFET DE LA TREMPÉ DANS LES DIFFÉRENTS LIQUIDES
 A = eau froide. B = mercure. C = eau à 80°. D = eau bouillante. E = acide sulfurique à 10%. F = huile de lin. G = plomb. H = eau à 50%. J = eau à 10%. K = Sprühregen.
 D'APRÈS
 LE CHATELIER - Kœdicke

L'expérience montre qu'il est avantageux de dépasser le point de transformation de 20 à 40°. Un inconvénient de cette surchauffe

est de provoquer de plus grandes déformations et, par suite, de plus fortes tensions lors de la trempe. On y a remédié :

a) Par le procédé dit de la trempe « bei Fallender Hitze », l'objet est tenu quelques instants à l'air puis plongé dans le liquide de trempe quand on croit la température de transformation atteinte. L'inconvénient de ce refroidissement à l'air est qu'il donne des inégalités de répartition de température;

b) Un meilleur procédé consiste à porter la pièce à la température supérieure de 40° dans un premier four, à la refroidir à la température de transformation dans un autre four (autant que possible dans un bain de sel) et enfin de tremper.

Grandes règles pratiques de la trempe.

1. Chauffer les objets progressivement et régulièrement, de façon à leur donner une température uniforme.

Les différents procédés de chauffage sont énumérés ci-dessous :

Le bain de sel est le procédé idéal de chauffage. Il est d'ailleurs très utilisé à Remscheid et aux environs pour la trempe de mèches hélicoïdales, des coussinets à fileter, filières, fraises, limes, etc. Les sels dont l'usage est le plus fréquent sont : K_2SO_4 , $BaCl_2$, $NaCl$, KCl . Leurs mélanges en diverses proportions donnent toutes les températures de trempe désirées.

La fusion du sel peut être obtenue et maintenue par chauffage au combustible solide (charbon et coke) (très rarement), au gaz (c'est le cas le plus fréquent à Remscheid), à l'huile ou à l'électricité (on emploie dans ce cas le courant alternatif, car le continu provoque l'électrolyse du sel). Ce dernier est encore peu répandu quoiqu'ayant de multiples avantages. Les creusets en graphite et les récipients poreux sont à rejeter pour le sel; ce qui convient le mieux est encore un récipient en fer forgé doux.

Le grand avantage du bain de sel est de donner la température voulue automatiquement. En effet, quand l'objet est plongé dans le bain de sel, il refroidit les environs immédiats et se recouvre d'une couche solide qui ne fondra que lorsque la température de l'objet sera celle de fusion du sel. En le retirant du bain, il se recouvre encore d'une couche de sel qui le protège contre le refroidissement et l'action de l'air.

Comme d'ailleurs ce sel se dissoudra au premier contact avec l'eau, il n'y a dans ce cas aucun inconvénient pour la trempe. Mais, lorsque la trempe se fait à l'huile, la croûte de sel ne se

dissout pas. Elle se fissure et tombe presque aussitôt. Le refroidissement est cependant plus lent et plus irrégulier, ce qui n'a guère d'inconvénients pour les aciers rapides mais peut en avoir pour d'autres aciers comme les aciers au Cr pour outils, par exemple.

Le bain de plomb est donc plutôt à conseiller pour ces aciers, bien qu'on lui reproche sa grande densité qui nécessite le maintien de l'objet dans le bain, l'adhérence dans les cavités et son oxydation facile.

Il est encore cependant très utilisé dans l'industrie du petit outillage.

Les fours électriques de trempe (à moufle) restent avant tout des instruments de laboratoire. Par contre,

les fours à gaz sont très utilisés, surtout lorsque les dimensions des objets deviennent un peu fortes. On utilise généralement du gaz d'éclairage (Glockenstahlwerke Remscheid, gaz de cokerie), parfois aussi du gaz de gazogène (voir un ex. de ces fours fig. 8).

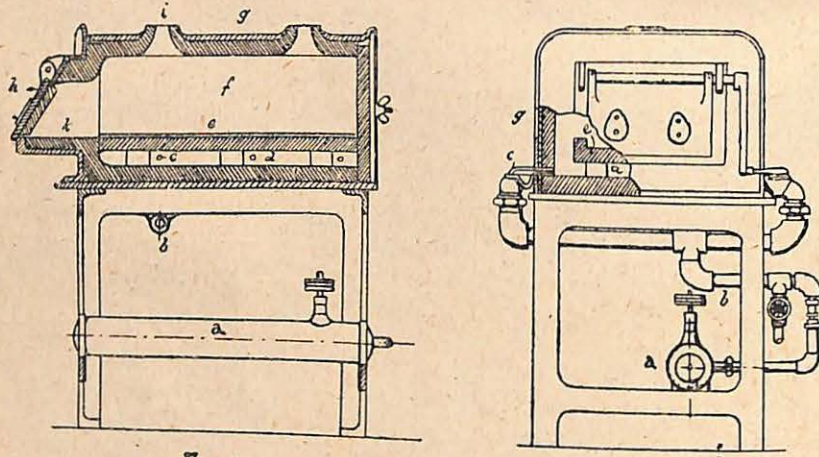


Fig 8 FOUR CHAUFFÉ AU GAZ POUR TREMPE

Bien que moins à conseiller que les bains ci-dessus, les fours à gaz donnent cependant une température assez régulièrement répartie et qui reste constante pour un débit donné (de gaz et d'air).

Viennent ensuite les fours à réverbère, encore très employés à Remscheid pour les scies à disques, les couteaux de grandes dimensions.

Les fours avec chauffage direct à l'huile sont peu employés.

Le chauffage par four à moufle est encore très en usage.

La répartition de la température y demeure assez égale, surtout dans les mouffles en terres réfractaires. Quant aux feux de forge, ils constituent le plus mauvais des procédés de chauffage pour la trempe (inégalité de répartition des températures : on y remédie en tournant l'objet et en le retirant de temps en temps pour empêcher un chauffe trop rapide des coins et angles). Danger du soufre (coke).

2. Tremper les objets en tenant compte de leurs dimensions, de leurs usages, de leurs formes, de leur composition.

On se rappelle que la trempe fait naître dans l'objet, même quand elle est bien exécutée, des tensions dues : aux changements de volume qui accompagnent d'une part la formation de martensite (plus volumineuse) et, d'autre part, la chute rapide de température. De plus, tout objet trempé se trouve, tout comme un corps endothermique, à un état peu stable.

Mais, à côté de ces variations, il faut tenir compte d'un autre phénomène dont on oublie trop souvent les effets.

La fig. 9 donne les variations de longueurs subies par une barre d'acier lors de son échauffement ou de son refroidissement. C'est ainsi qu'on remarquera qu'à la température de transformation, durant le refroidissement qui nous intéresse spécialement, la barre qui s'est constamment raccourcie jusque là s'allonge légèrement.

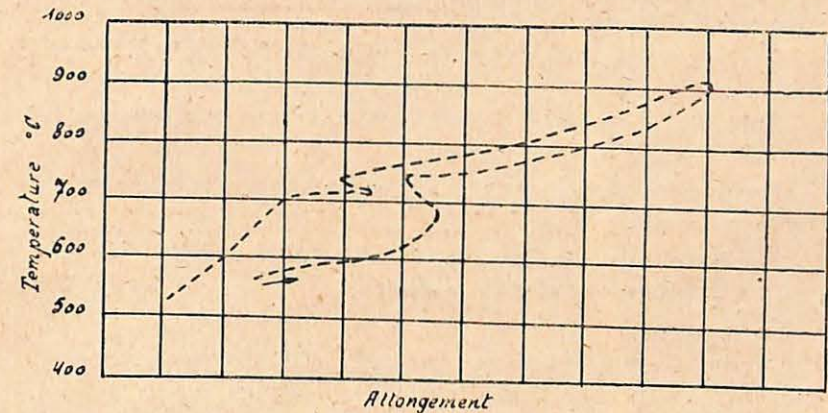


Fig 9 VARIATION DE L'ALLONGEMENT D'UNE BARRE D'ACIER AVEC LA TEMPERATURE

Or, pour les pièces assez volumineuses, la couche supérieure seule prend la trempe, l'intérieur reste à l'état naturel et il peut se faire que l'extérieur se soit déjà figé avant que l'intérieur soit arrivé à la température critique à laquelle la dilatation se produisant pourra briser l'enveloppe extérieure.

La trempe sera donc d'autant plus douce :

1° que les formes de l'objet seront plus compliquées (les différences de vitesses de refroidissement s'ajoutent aux raisons ci-dessus pour augmenter les tensions).

On y remédie encore en trempant tout d'abord les parties les plus épaisses, afin que les forces que leur contraction fait naître agissent sur des parties minces non encore refroidies ;

2° que ses dimensions seront plus faibles (l'objet absorbe une quantité considérable d'énergie par rapport à son volume) ;

3° que l'acier contiendra plus de cémentite (car il est alors naturellement fragile — voir aciers soumis au choc) ;

4° que la sollicitation au choc sera à prévoir (la fragilité est l'écueil à éviter pour les aciers soumis au choc).

L'action de la trempe varie avec le moyen de trempe utilisé ; le facteur modificateur le plus actif est la chaleur de vaporisation dont dépend la nature de la couche de vapeur qui se forme autour de l'objet à tremper. La chaleur spécifique, la conductibilité et la viscosité interviennent beaucoup moins. Les courbes de la figure 7 (Le Chatelier) donnent une idée de la vitesse de refroidissement des objets dans divers liquides.

La trempe à l'eau peut donner des degrés de dureté différents suivant la température du liquide. Si on veut tremper dans de l'eau à 70-80°, on ajoute un sel comme $Ca Cl_2$ pour augmenter la température d'ébullition.

On pourrait obtenir de cette façon les mêmes degrés de trempe qu'avec l'huile.

Les huiles peuvent être classées dans l'ordre suivant, les premières donnant la trempe la plus forte :
Pétrole.

Glycérine — peut se mélanger à l'eau (1/3 environ de glycérine) pour la trempe des objets à angles fragiles.

Huiles minérales légères.
Huiles minérales lourdes.

Une couche d'huile à la surface de l'eau, en adhérant à la surface de l'objet, donne une trempe plus douce que l'eau seule mais, naturellement, moins douce que l'huile.

Au lieu de l'huile, on utilise parfois de l'eau à laquelle on ajoute soit du savon, de la chaux ou de l'argile.

Pour les fils d'acier étirés ou trempés au bain de plomb, cette trempe très douce agit comme un recuit peu prononcé, grossissant le grain du métal et diminuant légèrement sa résistance.

Pour la trempe des objets minces, comme les lames de scies, de rasoirs, etc., l'emploi d'une presse avec circulation d'eau (fig. 10) ou d'huile chaude pour le revenu, est à recommander. Enfin, la

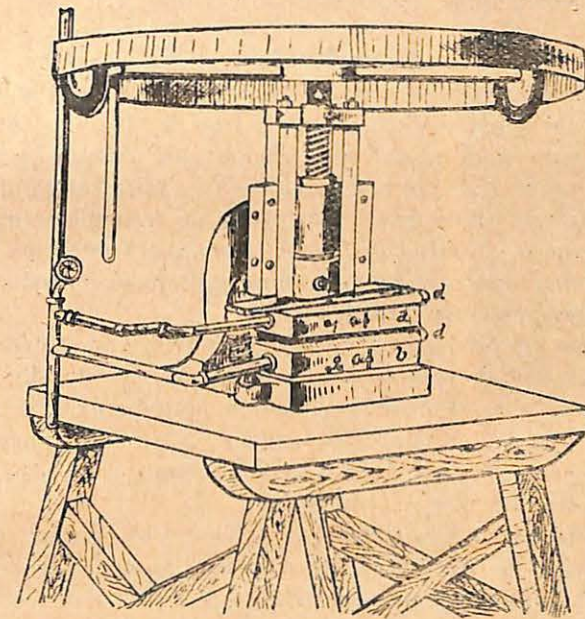


Fig. 10 PRESSE POUR TREMPER DE
BANDES D'ACIER

trempe à l'air s'obtient par simple refroidissement à l'air, mais très souvent aussi avec l'aide de tuyères. La température durant le refroidissement doit être tout aussi uniformément répartie que durant l'échauffement. Il importe donc de remuer le corps à trem-

per ou, quand celui-ci est de trop fortes dimensions, de remuer l'eau autour du corps.

La chaleur de forgeage n'est jamais utilisée pour arriver à la température de trempe.

Si la teneur en cémentite d'un acier est telle que la transformation de sa perlite en martensite ne donne qu'une augmentation insignifiante de dureté, on dit qu'il possède la dureté *naturelle*.

Un acier sera, par contre, auto-trempeant, quand la vitesse de transformation des constituants stables au-dessus de la zone de transformation est si faible qu'elle est inférieure à celle du refroidissement lent d'après recuit (acier au Cr, Mn, Ni).

C. — Revenu.

La trempe, qui augmente généralement la résistance et la dureté de l'acier, lui donne malheureusement trop de fragilité. On peut diminuer cette fragilité par une trempe plus douce, comme on l'a vu ci-dessus. Mais, le vrai moyen est de faire revenir l'acier après la trempe, car le revenu est comme un traitement correctif très élastique et d'application facile, alors que l'obtention de la qualité d'acier désirée par une trempe appropriée immédiate est toujours une opération difficile.

Le revenu consiste à porter l'acier trempé à une température inférieure à celle de transformation et à le laisser refroidir lentement. Le revenu provoque une transformation successive de la martensite (ou de l'austénite) de la tempe en troostite, osmondite, sorbite et, finalement, en perlite, quand la température et la durée de son application sont suffisantes.

Les divers états intermédiaires sont obtenus en agissant sur ces deux facteurs. Généralement, on recherche la structure de l'osmondite. La cémentite, solution solide figée par la trempe, obéit à sa tendance à la cristallisation dès que la température permet un déplacement plus facile des molécules.

A ce début de la cristallisation, les dimensions des cristaux sont successivement réduites : d'où la désignation d'ultramicroscopique donnée par Benedics à cette structure qui est celle de l'osmondite.

On aura l'occasion de revenir sur les propriétés de ces divers constituants dans les chapitres qui suivront, de même que sur le traitement qui les donne.

La température de revenu est obtenue par un quelconque des moyens décrits pour la trempe. Pour les outils, les plus fréquents sont le bain d'huile et le bain de plomb auquel on ajoute une certaine quantité d'étain (ou d'antimoine) pour obtenir la température désirée.

Quand on emploie l'huile, on utilise parfois deux bains : le premier à 120°, le second à la température désirée, l'échauffement est plus progressif.

D. — Cémentation.

Voir les aciers de construction.

(A suivre.)