Fontes, aciers et alliages divers pour moulage de pièces devant résister à l'abrasion, à la corrosion, ou satisfaire à certaines caractéristiques

Cast irons, steels and various alloys
intended to resist abrasion or corrosion,
or to satisfy certain specifications

PAR R. POIROT

INGÉNIEUR E.E.M.I. ET E.S.F.
INGÉNIEUR AU CENTRE D'INFORMATION DU NICKEL

Rappel sommaire des cas pouvant se présenter dans le choix d'un matériau pour des pièces de pompes, de turbines, etc. — Limitation de l'exposé à deux cas typiques : « Abrasion » et « Corrosion ».

L'abrasion peut avoir un caractère peu sévère, et dans ce cas la fonte à graphite sphéroïdal perlitique est indiquée; l'abrasion peut au contraire être très sévère : suivant que les pièces seront ou non usinées. et subiront ou non des chocs en service, on envisage les fontes martensitiques, soit grises, soit blanches, du type Ni-Hard. Les pièces à profil compliqué sont du domaine de l'acier nickel-chrome trempant à l'air. Les compositions, les propriétés, les conditions de réception et le traitement de ces métaux sont ici définis.

La corrosion relève des fontes austénitiques du type Ni-Resist, des aciers inoxydables du type 18/8, des alliages de cuivre et de nickel à haute teneur en nickel dont le type est le métal Monel, ou encore des bronzes d'aluminium au nickel. Là encore, l'auteur indique les meilleures compositions, les caractéristiques, ainsi que les conditions d'emploi et d'usinage des divers alliages.

A résumé of problems likely to arise when choosing materials for components of machines such as turbines and pumps. Considerations limited to two typical cases; "Abrasion" and "Corrosion".

Abrasion may be slight and in such cases perlitic cast iron containing spheroidal graphite is indicated. On the other hand, where abrasion is acute, grey or Ni-Hard type white martensitic cast irons are to be used, according to whether or not the component is to be machined, and whether or not it is to be subjected to shocks when in use. Components of complicated shape are to be made of air-hardened nickel-chromium steel. The composition, properties, acceptance tests, and treatment of these metals are defined.

Corrosion makes necessary Ni-Resist type austenitic cast irons, 18/8 type stainless steels, cooper-nickel alloys with a high nickel content as typified by Monel metal, or even aluminium bronzes containing nickel. Here again the author indicates the characteristics, the best composition as well as ways of using and machining these alloys.

INTRODUCTION

Le choix d'un matériau pour des pièces de pompes, de turbines, de matériel hydraulique, n'est pas toujours aisé car elles doivent souvent répondre à des conditions de service variées, en mettant même de côté les influences de l'abrasion, de la corrosion, de l'érosion et de la cavitation. Telle pièce devant résister à l'abrasion devra aussi avoir une résistance au choc acceptable, ou un bon frottement ou pouvoir être usinée avec précision; de même telle autre pièce

aura à résister à la fois à l'abrasion et à la corrosion, telle autre encore, tout en résistant à la corrosion, devra avoir un bon frottement, ou une bonne résistance à la chaleur, ou être facilement moulable, etc.. Faire une classification de tous les cas devant lesquels on peut se trouver et en déduire le matériau à utiliser serait une énumération difficile et fastidieuse. C'est pourquoi nous avons préféré considérer séparément les deux cas typiques « Abrasion » et

FIG. 1. — Fonte à graphite lamellaire. On voit nettement que les lamelles de graphite à extrémités aiguës entaillent la matrice et en diminuent ainsi les caractéristiques mécaniques.

« Corrosion » pour lesquels nous indiquerons quelques matériaux dont la qualité première est de résister principalement à l'un de ces phénomènes et dont nous essaierons de faire ressortir d'autres propriétés permettant de guider le constructeur pour le choix définitif de tel ou tel autre métal.

Les matériaux dont nous allons parler, les fontes alliées surtout, sont des métaux spéciaux qui demandent certains soins d'élaboration et de moulage, souvent de traitement thermique. Nous insistons donc dès à présent sur le fait que de tels métaux doivent être commandés à des fondeurs qui en ont l'expérience.

I. — ABRASION

Lorsque la question de résistance à l'abrasion est posée, la réponse est généralement l'emploi d'un matériau de dureté très élevée : la résistance à l'abrasion est généralement fonction de la dureté, mais il ne faut pas considérer cette carac-

téristique comme seule indispensable. Ainsi, une même dureté peut être obtenue avec des matériaux de structures différentes; or, une structure peut avoir une meilleure résistance à l'abrasion qu'une autre qui, d'autre part, donne, par exem-

FIG. 2 et 2'. — Fonte à graphite sphéroïdal. Le graphite cristallisé sous forme de sphères n'affecte plus les caractéristiques mécaniques de la matrice.

ple, une dureté élevée au prix d'une grande fragilité.

D'autre part, le choix du matériau dépend bien entendu des conditions de service. Mais notre étude rapide sera surtout un examen des duretés et de la répercussion de celles-ci sur d'autres propriétés : usinabilité, résistance mécanique...; nous adopterons le plan suivant :

1. ABRASION PEU SÉVÈRE :

— Fonte à graphite sphéroïdal perlitique.

2. ABRASION SÉVÈRE :

- a) *Fontes grises à structure martensitique* (les pièces doivent être usinées et ne subissent pas de chocs importants en service);
- b) *Fontes blanches martensitiques (type Ni-Hard)* (les pièces n'ont pas à être usinées et ne nécessitent pas une bonne résistance aux chocs).
- c) *Acier nickel-chrome trempant à l'air* (les pièces, d'un profil compliqué, doivent avoir une dureté élevée à cœur et une résistance mécanique élevée).

1) Abrasion peu sévère

Dans le cas d'abrasion peu sévère, il n'est peut-être pas utile d'employer des matériaux très durs. Jusqu'ici on ne pouvait pas non plus songer à utiliser une fonte grise non alliée à graphite lamellaire, du fait de ses caractéristiques mécaniques faibles, sa fragilité et sa dureté peu élevée. Ces points faibles sont dus à la forme même du graphite, comme le montre la figure 1.

FIG. 3. — Evolution de la résistance à la traction des fontes notamment depuis ces trente dernières années. Cette courbe montre les fortes améliorations obtenues avec les fontes spéciales et les résistances remarquables obtenues avec les fontes à graphite sphéroïdal.

Un traitement spécial de la fonte, découvert il y a six ans environ, a permis de faire cristalliser le graphite sous forme de sphères (*) (fig. 2 et 2'). Cette fonte, dont le graphite n'entaille plus la matrice, a des caractéristiques mécaniques élevées (fig. 3) tout en conservant la facilité de moulage de la fonte grise ordinaire.

Elle peut avoir une structure soit perlitique obtenue à l'état brut de coulée (résistance à la traction élevée, allongements encore faibles), soit ferritique après recuit (résistance à la traction plus faible, mais allongements élevés), soit enfin ferrito-perlitique après recuit de ferritisation incomplet (caractéristiques mécaniques intermédiaires).

C'est avec une structure perlitique que la fonte à graphite sphéroïdal a les duretés les plus élevées; c'est donc de ce type dont nous parlerons surtout : des propriétés mécaniques, de la tenue à la pression, du frottement, du moulage, de l'usinabilité.

1° PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES :

Les caractéristiques mécaniques à l'essai de traction de la fonte à graphite sphéroïdal perlitique peuvent varier dans ces limites :

$$R = 58-80 \text{ kg/mm}^2, \quad E = 42-60 \text{ kg/mm}^2,$$

$$A = 0,5-5 \%, \quad H_B = 250-300.$$

Les caractéristiques minimum sont celles garanties par une spécification des fondeurs licenciés pour la production de ces fontes.

Les caractéristiques maximum sont celles que l'on peut atteindre après traitement de normalisation, c'est-à-dire chauffage à 900° C suivi d'un refroidissement à l'air calme.

La dureté de cette fonte peut s'échelonner, suivant la composition chimique, entre 250 et 300 Brinell. Dans le cas de pièces devant résister à une abrasion peu sévère, il sera préférable de choisir les nuances à plus fortes duretés, c'est-à-dire 280-300 Brinell.

D'autre part, la résistance au choc de la fonte à graphite sphéroïdal est supérieure à celle des meilleures fontes grises à graphite lamellaire. Pour une même structure perlitique, la résilience sur éprouvettes de 10 × 10 × 55 mm non entaillées et cassées sur appuis distants de 40 mm, est de 1 kgm/cm² environ pour une fonte à graphite sphéroïdal, c'est-à-dire bien supérieure au travail de rupture obtenu avec une fonte à graphite lamellaire.

(*) Ces nouvelles fontes à graphite sphéroïdal font l'objet de brevets qui pour l'Europe, sont la propriété de la Mond Nickel Co. de Londres.

FIG. 4. — Tuyau centrifugé de 250 mm de diamètre intérieur après essai de pression à outrance. Il s'est fissuré pour une pression de 340 kg/cm².

2° TENUE A LA PRESSION :

EAGAN et JAMES (*) ont publié les résultats d'essais effectués sur des récipients à pression en fonte grise ordinaire, fonte alliée, acier moulé et fonte à graphite sphéroïdal; ces résultats indiquent que les pressions d'éclatement sont sensiblement proportionnelles à la charge de rupture du métal, ce qui situe bien la nouvelle fonte. Au cours d'essais de pression on a remarqué qu'elle n'éclatait pas en fragments, mais qu'elle se fissurait après gonflement (fig. 4); citons, par exemple, des essais de pression effectués sur des tuyaux centrifugés de 11 mm d'épaisseur qui, en fonte à graphite sphéroïdal, n'ont cédé que sous une pression de 340 kg/cm², alors que ceux en fonte ordinaire se rompent sous 150 à 200 kg/cm².

3° FROTTEMENT :

Le passage de la forme lamellaire à la forme sphéroïdale du graphite ne semble guère modifier cette qualité. A même quantité de graphite et à dureté semblable, la fonte à graphite sphéroïdal a sensiblement le même frottement que la fonte à graphite lamellaire.

La matrice de la fonte a aussi une influence sur cette propriété et, pour un bon frottement, il

FIG. 5. — Impulseur de ventilateur en fonte à graphite sphéroïdal. Les ailettes de 3 mm d'épaisseur sont très bien venues de fonderie.

(*) EAGAN et JAMES : *A practical Evaluation of Ductile Cast Iron*. Iron Age, 1949, CLXIV, déc. 8, 75-79, déc. 15, 77, 82.

est recommandé d'utiliser une fonte à structure perlitique.

4° MOULAGE :

Tous les moulages de petites (fig. 5) ou fortes (fig. 6) dimensions normalement coulés en fonte, acier ou non ferreux, peuvent être exécutés en fonte à graphite sphéroïdal. Néanmoins, il est important de signaler que son aptitude à la retassure est nettement plus marquée que celle de la fonte ordinaire. Aussi le constructeur aurait-il intérêt, chaque fois que cela sera possible, à éviter dans le profil des pièces tous les changements brusques de section et la présence de masses importantes.

5° USINABILITÉ :

Malgré sa dureté plus élevée, la fonte à graphite sphéroïdal s'usine aussi bien que la fonte ordinaire. Par exemple la durée de l'outil est à peu près la même avec une fonte à graphite sphéroïdal de 220 Brinell et une fonte grise ordinaire de 145 Brinell. Néanmoins, la consom-

mation d'énergie est supérieure pour la fonte à graphite sphéroïdal.

Le poli de surface est, d'autre part, bien supérieur à celui de la fonte ordinaire et semblable plutôt à celui de l'acier.

2) Abrasion sévère

a) Les pièces doivent être usinées et ne subissent pas de chocs importants en service :

FONTES GRISES MARTENSITIQUES :

Le nickel est un graphitisant, mais en outre il a une action sur la matrice de la fonte. Avec des additions croissantes de nickel, la dureté commence par croître, passe par un maximum, puis décroît, ce qui correspond à une modification de structure, c'est-à-dire au passage de la perlite à la sorbite, puis à la martensite, puis enfin à l'austénite. Les duretés les plus élevées correspondent à des teneurs en nickel de 4 à 10 %, c'est-à-dire à une structure martensitique.

Il est, d'autre part, nécessaire de régler la teneur en nickel en fonction de l'épaisseur du moulage, ainsi, évidemment, que celles en silicium et chrome. Le tableau I donne les com-

FIG. 6. — Superstructure de turbine Pelton. Ce moulage de 11 tonnes a été coulé en fonte à graphite sphéroïdal.

TABLEAU I

Epaisseur des pièces	COMPOSITION CHIMIQUE				
	Cr	Si	Mn	Ni	Cr
5 à 10 mm	3-3,3	2,5-1,8	0,8-1	3,5-4	0,3-0,8
10 à 15 mm	—	2,2-1,6	—	3,8-4,5	0,5-1
15 à 20 mm	—	1,8-1,4	—	4 -4,5	0,7-1
20 à 50 mm	—	1,5-1,2	—	4,2-5	0,8-1,2

TABLEAU II

Cr	Si	Mn	Ni	Cr	Dureté Vickers 50 kg	Résilience kgm/cm ²	Micro-structure
3,57	0,56	0,43	0	0	540	0,16	carbure +perlite
3,57	0,56	0,43	0	1,95	576	0,21	carbure +perlite
2,90	0,48	0,36	4,35	1,70	593	0,43	carbure +martensite +austénite

TABLEAU III

Cr	Si	Mn	Ni	Cr	Dureté Vickers 50 kg	Résilience kgm/cm ²	Micro-structure
3,57	0,56	0,43	0	0	540	0,16	carbure +perlite
3,57	0,56	0,43	0	1,95	576	0,21	carbure +perlite
3,57	0,56	0,56	3,80	1,95	665	0,28	carbure +martensite +un peu d'austénite

positions préconisées pour des moulages d'épaisseur moyenne allant de 5 à 50 mm.

Ces fontes, de composition correctement choisie, donnent des moulages inusinables à l'état brut de coulée, *mais* un revenu à 600-625° C les adoucit et permet ainsi leur usinage. — Après usinage, les moulages peuvent être à nouveau

durcis par chauffage à 850° C suivi d'un refroidissement à l'air calme. Il est recommandé de faire suivre ce traitement d'un revenu à 250-300° C pour détruire les tensions internes qui peuvent se produire au cours de la trempe martensitique. Après ces traitements, les moulages ont des duretés de l'ordre de 350-400 Brinell.

Comme pour les fontes non alliées, le graphite peut être, aussi dans ce cas, lamellaire ou sphéroïdal. Le graphite sphéroïdal permet d'obtenir des caractéristiques mécaniques élevées, puisque l'on a atteint jusqu'à 120 kg/mm², et des duretés de l'ordre de 450-500 Brinell.

b) Les pièces n'ont pas à être usinées et ne nécessitent pas une bonne résilience au choc :

FONTES BLANCHES MARTENSITQUES DU TYPE NI-HARD :

— Les fontes blanches martensitiques permettent d'obtenir les mêmes duretés qu'avec les fontes blanches non alliées à structure perlitique, *mais avec une quantité moindre de carbure et donc avec moins de fragilité* (Tableau II).

— A quantité équivalente de carbure, les fontes blanches martensitiques ont des duretés *plus élevées* que les fontes blanches perlitiques (Tableau III).

Donc pour une bonne résistance à l'abrasion, selon que la pièce en service risque ou ne risque pas de subir des chocs, on peut employer une fonte blanche martensitique à bas carbone, c'est-à-dire avec moins de carbure et par suite moins fragile, ou une fonte blanche martensitique plus carburée, à haut carbone, c'est-à-dire à dureté élevée.

COMPOSITIONS :

Comme pour les fontes grises martensitiques, la teneur en nickel doit être réglée en fonction de l'épaisseur du moulage. Elle doit être moindre dans les moulages minces pour ne pas y avoir d'austénite résiduelle, et plus élevée dans les moulages épais pour ne pas y avoir de perlite.

Il faut aussi régler la teneur en nickel en fonction de la teneur en carbone.

De même, les teneurs en silicium et chrome seront déterminées par rapport à l'épaisseur du moulage. Le chrome a pour rôle principal de contre-balancer l'action graphitisante du nickel.

Tenant compte de ces considérations, nous donnons pour des pièces coulées en sable, dans le tableau IV, les compositions de fonte Ni-Hard préconisées en fonction des épaisseurs des moulages et de la teneur en carbone.

TABLEAU IV

COMPOSITION CHIMIQUE		HAUT CARBONE — GRANDE DURETÉ						BAS CARBONE — HAUTE RÉSISTANCE					
		Coulée en sable						Coulée en sable					
		Epaisseur (mm)						Epaisseur (mm)					
		12	25	50	75	100		12	25	50	75	100	
Carbone	Teneur %	3,6-3,2						3,2-2,7					
Silicium	»	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4
Manganèse	»	0,3-0,6						0,3-0,6					
Soufre	»	0,15 max.						0,15 max.					
Phosphore	»	0,40 max.						0,40 max.					
Nickel	»	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
Chrome	»	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5

CONDITIONS DE RÉCEPTION :

Si ces compositions *ont bien été respectées* par le fondeur en fonction de l'épaisseur des moulages, les pièces coulées en sable doivent avoir des duretés de 550-650 Brinell pour celles à haut carbone et 525-625 Brinell pour celles à bas carbone.

Ces duretés doivent être mesurées avec une bille en carbure de tungstène soit de 10 mm de diamètre sous une pression de 3.000 kg, soit de 5 mm de diamètre sous une pression de 750 kg.

D'autre part, les pièces coulées en fonte blanche martensitique du type Ni-Hard, comme celles coulées en fonte blanche ordinaire d'ailleurs, sont soumises à des tensions internes qui les rendent fragiles. Ces tensions cependant peuvent être facilement éliminées par un simple traitement de détente. *Les pièces doivent donc être livrées après avoir subi un revenu à 200-230° C pendant trois heures, plus une heure par 25 mm d'épaisseur supplémentaire.* Ce revenu n'altère pas la dureté des pièces.

c) Les pièces, d'un profil compliqué, doivent avoir une dureté élevée à cœur et une résistance mécanique élevée :

ACIER NICKEL-CHROME TREMPANT A L'AIR :

Nous citerons pour mémoire quelques nuances d'aciers bien connues comme susceptibles de donner des duretés élevées dans les moulages :

1° *Acier à 13 % de chrome* : sa dureté peut être augmentée par trempe à l'huile, mais pour des moulages compliqués on doit craindre les tapures;

2° *Acier au chrome-molybdène* contenant du nickel pour abaisser la vitesse critique de trempe;

3° *Aciers autotrepants au nickel-chrome* qui sont les plus importants et permettent d'obtenir dans les pièces des duretés à cœur élevées sans risque de tapures.

La composition de ces aciers peut varier dans les limites suivantes :

C_T — 0,25-0,60

Mn — 0,60-0,90

Ni — 2,80-4,50

Cr — 0,80-1,50

Ces aciers contiennent aussi la plupart du temps du molybdène qui a tendance à augmenter sensiblement l'autotrempe et diminue efficacement les phénomènes de fragilité après revenu ou après refroidissement lent. La teneur en cet élément est généralement de 0,2 à 0,5 %.

Le traitement thermique des pièces consiste, après recuit d'homogénéisation, en une trempe à l'air après chauffage à 850° C suivi d'un revenu. Selon la température du revenu, les caractéristiques mécaniques peuvent varier dans les limites suivantes :

R = 90-170 kg/mm²

E = 75-140 kg/mm²

A = 6-16 %

KE₂ = 5-14 kgm/cm²

H_B = 275-500

II. — CORROSION

Le problème de la résistance à la corrosion est aussi très complexe et a fait l'objet de nombreuses et longues études sur une grande diversité de matériaux. Nous nous bornerons, ici, à citer ceux qui sont les plus couramment employés et que nous avons étudiés plus particulièrement :

- les fontes austénitiques du type Ni-Résist,
- les aciers inoxydables du type 18/8,
- les cupro-nickel, et, en particulier, le métal Monel.

Fontes austénitiques du type Ni-Resist

Il existe plusieurs types de fontes austénitiques (Ni-Résist) (fig. 7) dont nous donnerons, en plus de leurs compositions, quelques indications sur le moulage, l'usinabilité, les propriétés mécaniques, la résistance à la chaleur.

1° COMPOSITIONS :

Les compositions sont indiquées dans le tableau V ci-après.

Chacune de ces compositions confère à la fonte une particularité d'emploi. Les types I et II sont les plus généralement utilisés.

Type I. Il est recommandé pour la manutention d'acides minéraux dilués.

Type II. Il résiste à un grand nombre de milieux corrosifs et du fait de sa basse teneur en cuivre, peut être employé dans les cas où cet élément est indésirable.

Types I a et II b. A basse teneur en carbone, ils ont une bonne résistance mécanique et peu-

vent être utilisés pour des pièces devant résister à la pression.

Type II b. Ce type à haute teneur en chrome peut être employé surtout pour résister à des températures allant jusqu'à 810-820° C. En outre, la dureté plus élevée (170-250 Brinell) de ce type lui confère une meilleure résistance à l'abrasion.

Type III. Il est recommandé dans le cas où les moulages sont soumis à des chauffages et refroidissements répétés entre la température ambiante et 225°, car il a un faible coefficient de dilatation.

Type IV. Il est supérieur aux autres types au point de vue résistance à la chaleur et à la corrosion.

Type V. Appelé « MINVAR ». Il est surtout utilisé pour son très faible coefficient de dilatation.

2° MOULAGE :

L'aptitude à la retassure de ces fontes est très marquée et semblable à celle de l'acier. Pour le tracé des pièces on prendra donc les mêmes précautions que pour celui des moulages d'acier; tous les changements brusques de sections sont à éviter. Lorsqu'il s'agit de couler avec cette fonte une pièce habituellement exécutée en un autre métal à caractéristique de solidification différente, on devra laisser au fondeur toute latitude pour modifier le modèle et assurer une alimentation correcte du moulage.

En outre, le retrait de cette fonte est élevé et de l'ordre de 16 ‰.

TABLEAU V

		Type I	Type I a	Type II	Type II a	Type II b	Type III	Type IV	Type V
Carbone	%	3 max.	2,80 max	3 max	2,80 max	3 max	2,75 max	2,60 max	2,40 max
Silicium	%	1 - 2,5	1,5 - 2,75	1 - 2,5	1,5 - 2,75	1 - 2,5	1 - 2	5 - 6	1 - 2
Manganèse	%	1 - 1,5	1 - 1,5	0,8 - 1,5	0,8 - 1,5	0,8 - 1,5	0,4 - 0,8	0,4 - 0,8	0,4 - 0,8
Nickel	%	13,5 - 17,5	13,5 - 17,5	18 - 22	18 - 22	18 - 22	28 - 32	29 - 32	34 - 36
Cuivre	%	5,5 - 7,5	5,5 - 7,5	0,5 max	0,5 max	0,5 max	0,5 max	0,5 max	0,5 max
Chrome	%	1,75 - 2,5	1,75 - 2,5	1,75 - 2,5	1,75 - 2,5	3 - 6	2,5 - 3,5	4,5 - 5,5	0,10 max

FIG. 7. — Corps de vannes et couvercles en fonte austénitique du type Ni-Résist.

3° USINABILITÉ :

L'usinage à bon marché de la fonte Ni-Résist la fait souvent préférer à un autre matériau résistant bien à la corrosion mais d'un usinage plus coûteux.

Pour une *dureté normale de 130-160 Brinell*, la Ni-Résist s'usine très bien. Il est recommandé d'utiliser dans ce cas des outils moulés en alliage non ferreux tels que stellite 98-M₂ qui permettent des vitesses de coupe de 10 à 15 % supérieures à celles adoptées avec l'acier rapide.

Pour des *duretés supérieures à 175 Brinell*, il faut utiliser des outils aux carbures en réduisant les vitesses sans diminuer beaucoup les avances.

Au-delà de *240 Brinell*, il faut utiliser le meulage.

4° PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES :

La charge de rupture à la traction, pour la plupart des types de cette fonte, varie de 17 à 25 kg/mm². Pour les types Ia et IIa à bas carbone, elle peut atteindre 35 kg/mm².

La dureté est de l'ordre de 130-180 Brinell. Elle peut atteindre 250 Brinell pour des teneurs en chrome élevées, mais dans ce cas l'usinage devient difficile.

Comme pour les fontes ordinaires, les fontes grises austénitiques peuvent avoir leur graphite sous forme de sphères, ce qui leur confère des caractéristiques mécaniques intéressantes. On a pu obtenir ainsi, par exemple, de 28 à 43 kg/mm² de charge de rupture à la traction avec 10 à 20 % d'allongement. La limite élastique, inexistante chez les fontes grises austénitiques à graphite lamellaire, peut atteindre pour ces fontes à graphite sphéroïdal 24-25 kg/mm². En outre, quelle que soit la forme du graphite, *la résistance à la corrosion reste sensiblement la même.*

5° RÉSISTANCE A LA CHALEUR :

Les fontes austénitiques ont une résistance à l'oxydation qui peut aller jusqu'à dix fois celle de la fonte ordinaire et une résistance au gonflement pouvant être supérieure de douze fois, pour des températures de 700 à 815°.

Cependant, les fontes Ni-Résist ne sont pas recommandées pour des températures supérieures à 800°, et, d'autre part, lorsque les produits véhiculés contiennent quantité de soufre, la limite d'utilisation se tient vers 550°. Par contre, le type IV, résistant au ternissement, a une meilleure tenue à des températures plus élevées et même en présence de soufre.

FIG. 8. — Turbine Francis en acier inoxydable Ni-Cr austéno-ferritique.
Poids brut 3 200 kg (Jacob Holtzer).

Aciers inoxydables

MOULAGE ET COMPOSITIONS :

Les aciers inoxydables austénitiques (fig. 8) sont plus difficiles à mouler que les aciers ordinaires, du fait d'une rapide pellicule qui se forme à la surface du bain, de leur mauvaise coulabilité, et de leur retrait important qui peut atteindre 25 %. La coulabilité peut être améliorée

par une augmentation des teneurs en carbone et en silicium. Une teneur en carbone plus élevée présente cependant l'inconvénient de nécessiter un traitement de mise en solution des carbures qui peut être délicat pour certaines pièces compliquées.

Devant les difficultés de moulage de ces aciers, il est impératif que le constructeur s'efforce pour le fondeur à uniformiser les épaisseurs des pièces.

Les deux compositions types pour le 18/8 moulé sont :

%	C ≤ 0,7.	Cr ≥ 18.	Ni ≥ 8.	Mn ≤ 1.	Si ≤ 2.	S et P ≤ 0,05.	Mo 2 à 4
%	C ≤ 0,20.	Cr ≥ 18.	Ni ≥ 8.	Mn ≤ 1.	Si ≤ 1.	S et P ≤ 0,05.	Mo 2 à 4
On peut obtenir : R ≥ 50 kg/mm ² E ≥ 23 kg/mm ² A ≥ 40 %, sur 50 mm H _B ≤ 200							

Il est possible d'améliorer ces caractéristiques mécaniques sans changer beaucoup la résistance à la corrosion en utilisant soit des aciers 18/8 contenant un ou plusieurs éléments : silicium, cuivre, titane, bore, aluminium... et employés après un traitement thermique dit de durcissement structural, soit des aciers à plus forte teneur en chrome (sans changer la teneur en nickel ou en l'abaissant) à structure austéno-ferritique et qui peuvent aussi subir le traitement de durcissement structural.

Alliages à haute teneur en nickel

LE MÉTAL MONEL :

Ce métal est un alliage nickel-cuivre comprenant environ deux tiers de nickel et un tiers de cuivre. Il résiste bien à un bon nombre d'agents corrosifs tels que le sel marin, les alcalis caustiques, l'acide sulfurique, le sulfate d'ammonium... et il conserve, aux températures élevées, une bonne partie de sa résistance.

Sa composition est comprise dans les limites suivantes :

Ni = 67 %, Cu = 28 %, Fe = moins de 3,5 %, Si = 0,75-2 %, C = 0,15-0,25 %, Mn = 0,50 % environ, S = le moins possible.

Les caractéristiques mécaniques de ce métal sont comprises dans les limites suivantes :

R = 36-52 kg/mm², E = 17-24 kg/mm²,

A = 16-40 %, H_B = 100-140.

LES CUPRO-NICKELS A L'ÉTAIN ET AU SILICIUM :

Ces alliages peuvent être intéressants pour des pièces devant avoir une grande dureté à froid ou à chaud, et un bon frottement. Leur composition varie dans les limites suivantes :

Ni = 50 à 65 %, Sn = 2 à 12 %, Si = 1 à 3 %, Impuretés = 1 à 3,5 % (Fe, Mn...), Cu = le solde.

Ils ont une dureté pouvant dépasser 350 Brinell et qui reste à peu près constante pour des températures allant jusqu'à 600°.

Ils sont formés d'une matrice relativement molle dans laquelle sont noyés des cristaux très durs semblables aux constituants des bronzes et d'autant plus nombreux que les teneurs en étain et silicium sont élevées. On est cependant limité pour les teneurs en ces éléments car ils ont tendance à favoriser les retassures dans les pièces.

HASTELLOYS :

Pendant longtemps le problème de résistance à la corrosion par des produits très actifs (acides chlorhydrique, sulfurique, phosphorique) est resté sans solution pratique. La mise au point d'alliages nickel-molybdène ou chrome-nickel-molybdène, appelés Hastelloys, a pu résoudre cette question. Il en existe de nombreuses compositions.

L'Hastelloy C, par exemple, de composition : Cr = 14 %, Ni = 58 %, Mo = 17 %, Fe = 6 %, a, à l'état moulé, les caractéristiques mécaniques suivantes :

R = 52-56 kg/mm², E = 31-33 kg/mm²,

A = 10-15 %, H_B = 175-215.

Il résiste bien dans les solutions chlorhydri-

ques et sulfuriques contenant des sels oxydants et jusqu'à des températures de 70° environ; de même, il a une bonne tenue en présence de chlore humide.

LES BRONZES D'ALUMINIUM AU NICKEL :

Le nickel augmente la résistance mécanique et améliore les résistances à la corrosion, à l'usure et à la chaleur des bronzes d'aluminium pour des additions allant jusqu'à 5 %. Ces bronzes spéciaux ont, en outre, une bonne résistance à la cavitation, à l'érosion et à la fatigue sous corrosion.

Le type de bronze d'aluminium au nickel le plus employé pour les moulages a la composition suivante :

Cu = 78 %, Al = 10 %, Fe = 4 %, Mn = 3,5 %, Ni = 5,5 % max.

Les caractéristiques mécaniques de cet alliage sont :

	<i>Brut de coulée</i>	<i>Traité</i>
R en kg/mm ²	60-65	78-80
E en kg/mm ²	28-30	43-45
A en %.....	6	5
H Brinell.....	190	200

Par trempe et revenu, la résistance à la traction et la dureté de ce bronze d'aluminium au nickel peuvent être augmentées aux dépens de la ductilité, comme l'indiquent les chiffres ci-dessus. Généralement, cet alliage est utilisé à l'état brut de coulée, notamment pour des moulages importants ou compliqués. Pour des moulages plus simples où l'on désire augmenter la dureté, tels que siège et clapets de vannes, le traitement thermique peut être intéressant.

Les bronzes d'aluminium au nickel ont une très bonne résistance à la corrosion par l'eau douce ou l'eau de mer. En outre, l'alliage dont nous avons donné la composition ci-dessus résiste bien à la cavitation ou à l'érosion. Il convient donc bien pour des impulseurs de pompes, corps de vannes ou pompes.

Les bronzes d'aluminium au nickel conservent en grande partie leur résistance mécanique à des températures pouvant atteindre 400° C. Cette propriété, liée à leurs bonnes résistances à la corrosion et à l'oxydation, les rend propres à être utilisés en présence de vapeurs, dans les moteurs

à combustion interne, et pour certaines applications de l'industrie chimique.

Enfin, du fait de leur dureté relativement élevée, les bronzes d'aluminium au nickel peuvent être employés pour des pièces devant résister à l'usure soit par frottement à sec ou avec un peu de lubrification, soit par abrasion. Signalons d'autre part que ces bronzes conservent leur dureté à des températures plus élevées que les bronzes ordinaires.

*
**

Nous venons de passer en revue quelques-uns des métaux susceptibles de résister à l'abrasion,

à la corrosion, en essayant de faire ressortir, pour chacun d'eux, leurs propriétés essentielles permettant de guider le choix du constructeur. En dehors des nécessités de la mécanique, le choix du matériau, notamment pour l'hydraulique, est un cas précis, souvent un cas d'espèce où la nature des produits et certaines conditions de service sont une influence dominante et déterminante.

Dans ce texte, l'auteur a utilisé certaines données exposées au cours d'une conférence le 17 novembre 1954, 10, avenue Hoche, devant les constructeurs de la Chambre Syndicale des Constructeurs de Pompes.