

6.1 PRÉSENTATION

Le cuivre et le nickel sont mutuellement solubles en toutes proportions et ils ne forment donc qu'une solution solide α comme illustré sur la figure 22. Les propriétés varient régulièrement avec la composition. Seul le magnétisme se modifie de façon discontinue. Ainsi à 0 °C les alliages contenant moins de 68,5 % de nickel sont paramagnétiques alors que les alliages plus chargés sont ferromagnétiques comme le nickel. On réserve habituellement le nom de "cupro-nickel" aux alliages contenant moins de 50 % de nickel tandis que les alliages à teneur plus élevée en nickel sont dénommés nickel-cuivre (monel). De nombreuses additions d'éléments comme Fe, Mn, Al et Si sont possibles.

Les cupro-nickels se caractérisent par :

- une excellente résistance à la corrosion et notamment en eau de mer agitée ou en circulation,
- une insensibilité à la fissuration par corrosion sous contrainte,
- une grande aptitude, d'autant meilleure que la teneur en nickel est importante, à conserver de bonnes caractéristiques à des températures de l'ordre de 300 à 400 °C,
- des conductivités électrique et thermique relativement faibles.

Ces propriétés font qu'ils trouvent des applications importantes notamment dans les évaporateurs, les échangeurs de chaleur, les canalisations d'eau salée et les refroidisseurs de circuits hydrauliques. Ils sont en outre employés comme alliages monétaires.

Les cupro-nickels se travaillent très bien à froid et ont une bonne soudabilité à condition que leur pureté soit rigoureusement contrôlée.

Les cupro-nickels sont définis par les normes NF A 51-102 (tubes), NF A 51-112 (laminés), NF A 51-115 (plaques d'échangeurs), NF A 53-715 (produits moulés).

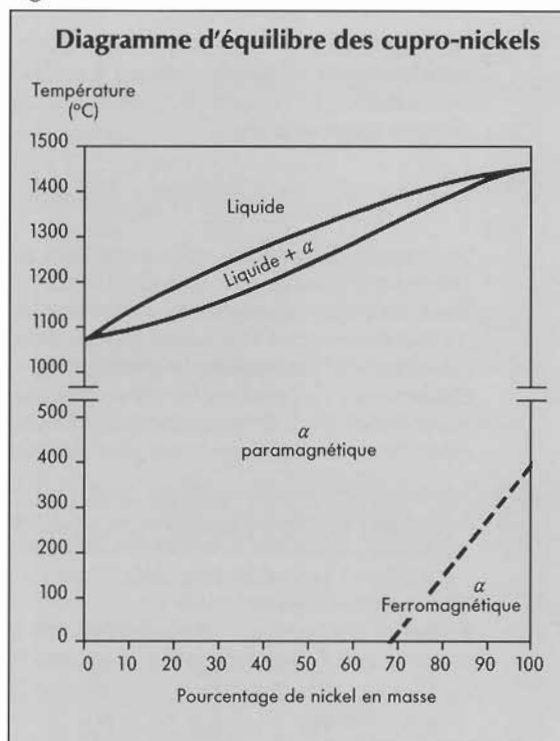
6.2 LES CUPRO-NICKELS DE CORROYAGE

6.2.1 Les cupro-nickels binaires

Les principales nuances de cupro-nickels binaires ont des teneurs en nickel variant de 5 à 45 %, les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion étant d'autant meilleures que la teneur en nickel est plus élevée.

On classe également dans cette catégorie les alliages contenant une addition mineure de manganèse destinée à désoxyder l'alliage en fonderie et à piéger

Figure 22



toute trace de soufre sous forme de MnS. Pour ces alliages monophasés, il n'existe pas de transformation de phase à l'état solide, et par conséquent les seuls traitements thermiques pratiqués sont le recuit de recristallisation et le traitement de détente.

Les alliages courants à 5, 20, 25 ou 30 % de nickel ont moins d'applications que les cupro-nickels avec addition de fer. On les utilise principalement dans la fabrication des monnaies et médailles ainsi que dans la décoration.

Le titre CuNi44Mn est un alliage particulier caractérisé par un coefficient de température de la résistivité électrique pratiquement nul. Il est donc utilisé en construction électrique sous différentes appellations (constantan) comme résistances stables.

6.2.2 Les cupro-nickels avec addition de fer

Les additions de fer dans les cupro-nickels sont destinées à améliorer la tenue à l'érosion et à la corrosion, notamment en eau de mer, et leur confèrent des caractéristiques mécaniques améliorées. La plupart de ces alliages contiennent également une addition désoxydante et désulfurante de manganèse.

Par ailleurs, ces alliages mettent à profit une propriété particulière du cuivre qui est la résistance à l'encrassement par les organismes marins, connue sous le nom de propriété anti-fouling.

La plupart des métaux (acier, aluminium, titane), lorsqu'ils sont immergés dans l'eau de mer, se recouvrent d'une couche épaisse d'organismes vivant en milieu marin. Le dépôt et la prolifération de ces organismes tels que mollusques, coquillages, algues, constituent le phénomène de biofouling. Ce phénomène peut présenter de graves inconvénients car la quantité d'organismes déposés peut devenir très importante, boucher les canalisations, réduire les transferts thermiques, et favoriser le développement de corrosion sous dépôt, dûe aux piles d'aération différentielle.

Les cupro-nickels, et notamment ceux qui sont fortement chargés en cuivre, trouvent ainsi des applications en milieu marin chaque fois que ces dépôts doivent être évités.

Les titres les plus utilisés sont les suivants :

- CuNi10Fe1Mn (ou CuNi10Fe)

- CuNi30Mn1Fe (ou CuNi30FeMn).

Ils permettent la réalisation de plaques, disques, tôles, tubes destinés aux échangeurs, évaporateurs et condenseurs, grands ensembles chaudronnés et soudés pour les centrales électriques, l'industrie chimique, les unités de dessalement de l'eau de mer et les canalisations offshore. Ces cupro-nickels trouvent également des applications dans l'aquaculture.

Le titre CuNi10Fe est en outre utilisé dans les canalisations de freins pour automobiles.

6.2.3 Les cupro-nickels à durcissement structural

Certains cupro-nickels spéciaux deviennent, grâce à des additions de Al ou Si, des alliages à durcissement structural (§ 2.5.1) par l'intermédiaire de la création de composés tels que Ni_3Al , Ni_2Si , ou Ni_3Si .

On trouve parmi ces alliages CuNi2Si (§ 2.5.6) et CuNi3Si.

L'alliage CuNi14Al2 est utilisé dans la marine et l'aéronautique. CuNi6Al2 est un alliage monétaire qui n'est pas utilisé pour ses propriétés de durcissement structural.

6.2.4 Les cupro-nickels à durcissement par décomposition spinodale

Il s'agit de cupro-nickels avec additions de Cr, Co, Mn ou Sn.

La décomposition spinodale est un phénomène par lequel l'alliage, constitué d'une seule solution

solide à haute température, se décompose, au refroidissement, en deux phases de même structure (cubique à faces centrées) mais de paramètres suffisamment différents pour créer des contraintes de cohérence qui provoquent le durcissement.

En pratique le traitement thermique s'effectue dans des conditions qui s'apparentent à celles du durcissement structural : mise en solution-trempe, suivie d'un revenu qui provoque la formation des deux phases responsables du durcissement, avec éventuellement un écrouissage intercalé.

L'alliage est souvent livré à l'état trempé ou trempé-écroui, le revenu étant réalisé après fabrication des pièces par l'utilisateur. Il peut aussi être livré par le fabricant à l'état revenu (mill-hardened - § 2.5.2).

Le principal alliage est le CuNi15Sn8 susceptible d'un durcissement très important lui permettant d'atteindre des caractéristiques voisines de celles de CuBe2 avec une très bonne tenue à la relaxation aux températures moyennes mais une moindre conductivité électrique.

Cet alliage trouve des applications dans les contacts électriques et les supports de semi-conducteurs.

6.3 LES CUPRO-NICKELS DE FONDERIE

Un certain nombre de cupro-nickels binaires ou complexes trouvent des applications dans le domaine de la fonderie. On peut citer CuNi10, CuNi30, CuNi30SiNb. Ces alliages comprennent tous des additions de fer pour une amélioration des caractéristiques mécaniques et de la résistance à la corrosion-érosion.

Certaines autres additions apportent des améliorations notables à leurs propriétés : caractéristiques mécaniques (Al, Sn, Si, Be), soudabilité (Nb).

Ces alliages ont une bonne tenue à chaud et une excellente tenue à la corrosion marine. Leurs principales applications concernent la fabrication d'échangeurs et de pompes.

6.4 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES CUPRO-NICKELS

Les cupro-nickels contenant moins de 15 à 20% de nickel sont de couleur rose. Au-dessus le nickel impose rapidement sa couleur et les cupro-nickels sont blancs.

Les principales propriétés physiques des cupro-nickels sont données au tableau suivant :

Propriétés physiques des cupro-nickels

Cupro-nickels de corroyage

	CuNi5	CuNi20	CuNi25	CuNi30	CuNi44Mn
Température du liquidus (°C)	1 125	1 200	1 220	1 240	1 300
Température du solidus (°C)	1 090	1 130	1 150	1 160	1 225
Intervalle de solidification (°C)	35	70	70	80	75
Masse volumique à 20 °C (kg/dm ³)	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
Coefficient de dilatation linéaire (10 ⁻⁶ /°C)	17,5	16,4	16,3	16,2	15
Capacité thermique massique à 20 °C (J/(kg.K))	376	376	376	376	419
Conductivité thermique à 20 °C (W/(m.K))	67	38	33	29	21
Conductivité électrique à 20 °C (% IACS)	15	6	5	5	3,5
Résistivité électrique à 20 °C (10 ⁻⁸ Ω.m)	11	29	34	34	49
Coefficient de température de la résistivité de 0 à 100 °C (10 ⁻³ /°C)	1,2	0,4	0,2	0,05	≈ 0

	CuNi5 Fe	CuNi10 Fe1Mn	CuNi30 Mn1Fe	CuNi3 Si	CuNi14 Al2	CuNi15 Sn8
Température du liquidus (°C)	1 125	1 145	1 240	1 060	1 115	1 115
Température du solidus (°C)	1 190	1 100	1 170	1 040	1 050	950
Intervalle de solidification (°C)	35	45	70	20	65	165
Masse volumique à 20 °C (kg/dm ³)	8,9	8,9	8,9	8,9	8,6	8,9
Coefficient de dilatation linéaire (10 ⁻⁶ /°C)	17	17	16	18	17	16,4
Capacité thermique massique à 20 °C (J/(kg.K))	376	376	376	376	376	376
Conductivité thermique à 20 °C (W/(m.K))	63	50	29	168*	33*	29*
Conductivité électrique à 20 °C (% IACS)	14	9	5	35*	10*	8*
Résistivité électrique à 20 °C (10 ⁻⁸ Ω.m)	12	19	34	5*	17*	22*
Coefficient de température de la résistivité de 0 à 100 °C (10 ⁻³ /°C)	1,2	0,7	0,05	2*	-	2,3*

Cupro-nickels de fonderie

* A l'état trempé écroui revenu.

	CuNi10	CuNi30	CuNi30SiNb
Température du liquidus (°C)	1 145	1 240	-
Température du solidus (°C)	1 105	1 160	-
Intervalle de solidification (°C)	40	80	-
Masse volumique à 20 °C (kg/dm ³)	8,7	8,8	8,8
Coefficient de dilatation linéaire (10 ⁻⁶ /°C)	17,1	16,2	18
Capacité thermique massique à 20 °C (J/(kg.K))	376	376	376
Conductivité thermique à 20 °C (W/(m.K))	25	20	20
Conductivité électrique à 20 °C (% IACS)	7	5	5
Résistivité électrique à 20 °C (10 ⁻⁸ Ω.m)	25	34	34

6.5 CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES CUPRO-NICKELS

6.5.1 Caractéristiques de traction et de dureté

On trouvera les principales caractéristiques mécaniques des cupro-nickels au tableau suivant :

Caractéristiques mécaniques des cupro-nickels					
<i>Cupro-nickels binaires</i> (valeurs moyennes à l'état recuit)					
	Charge de rupture (MPa)	Limite élastique à 0,2 % (MPa)	Allongement (A%)	Dureté Vickers	
CuNi5	270	90	45	65	
CuNi20	330	135	43	85	
CuNi25	350	145	43	90	
CuNi30	360	150	40	95	
CuNi44Mn	470	200	40	110	
<i>Cupro-nickels avec addition de fer</i> (valeurs moyennes à l'état recuit)					
	Charge de rupture (MPa)	Limite élastique à 0,2 % (MPa)	Allongement (A%)	Dureté Vickers	
CuNi5Fe	280	100	40	70	
CuNi10Fe1Mn	320	120	40	75	
CuNi30Mn1Fe	375	155	40	100	
<i>Cupro-nickels à durcissement structural</i> (valeurs moyennes)					
	Etat	Charge de rupture (MPa)	Limite élastique à 0,2 % (MPa)	Allongement (A%)	Dureté Vickers
CuNi3Si	Trempé	300	120	35	73
	Trempé, revenu	680	580	8	-
	Trempé, écroui 1/4 dur	340	310	21	-
	Trempé, écroui dur	440	430	10	-
	Trempé, écroui 1/4 dur, revenu	690	620	8	216
	Trempé, écroui dur, revenu	740	680	7	218
CuNi14Al12	Trempé	420	140	46	87
	Trempé, revenu	800	630	3	267
	Trempé, écroui dur	540	510	20	170
	Trempé, écroui ressort	660	550	6	192
	Trempé, écroui dur, revenu	900	760	6	283
	Trempé, écroui ressort, revenu	950	890	4	285

Caractéristiques mécaniques des cupro-nickels (suite)

Cupro-nickels à décomposition spinodale (valeurs moyennes)					
	Etat	Charge de rupture (MPa)	Limite élastique à 0,2% (MPa)	Allongement (A%)	Dureté Vickers
CuNi15Sn8	Trempé	515	240	40	125
	Trempé, écroui 1/2 dur	680	600	12	230
	Trempé, écroui dur	800	750	2	260
	Trempé, revenu	930	795	10	310
	Trempé, écroui 1/2 dur, revenu	1 100	1 030	5	350
	Trempé, écroui dur, revenu	1 240	1 170	3	370
	Mill hardened* doux	730	590	30	240
	Mill hardened* dur	1 130	1 070	3	355
Cupro-nickels de fonderie (valeurs minimales)					* Paragraphe 2.5.2
	Mode d'obtention *	Charge de rupture (MPa)	Limite élastique à 0,2% (MPa)	Allongement (A%)	Dureté Brinell 10/1000
CuNi10	Y20	280	120	20	70
	Y70-80	280	100	25	70
CuNi30	Y20	340	120	18	80
	Y70-80	340	120	18	80
CuNi30SiNb	Y20	440	230	18	115

* Y20 : moulé en sable, sans traitement thermique - Y70 : moulé en coulée continue, sans traitement thermique - Y80 : moulé par centrifugation, sans traitement thermique.

6.5.2 Constantes d'élasticité

Le module d'Young E (élasticité de traction) et le module de torsion G (élasticité de

cisaillement) sont donnés pour les cupro-nickels de corroyage à l'état recuit et pour les cupro-nickels de fonderie obtenus en moule de sable (Y20), dans le tableau suivant :

Constantes d'élasticité des cupro-nickels		
<i>Cupro-nickels de corroyage</i>		
	Module d'Young (MPa)	Module de torsion (MPa)
CuNi5	120 000	44 000
CuNi20	140 000	52 000
CuNi25	146 000	54 000
CuNi30	150 000	56 000
CuNi44Mn	165 000	61 000
CuNi5Fe	132 000	49 000
CuNi10Fe1Mn	135 000	50 000
CuNi30Mn1Fe	152 000	56 000
CuNi3Si*	145 000	54 000
CuNi14Al2*	145 000	54 000
CuNi15Sn8*	127 000	47 000
<i>Cupro-nickels de fonderie</i>		
CuNi10	123 000	45 000
CuNi30	145 000	54 000
CuNi30SiNb	145 000	54 000

* Etat TER.

Le coefficient de Poisson pour ces alliages est voisin de 0,35.

6.6 MISE EN ŒUVRE DES CUPRO-NICKELS

6.6.1 Le décapage

Le recuit brillant, c'est-à-dire effectué en atmosphère protectrice, $N_2 + H_2$ par exemple, permet d'éviter le décapage.

Si le décapage est requis on utilise un bain

sulfurique oxydant, comme H_2SO_4 (80 à 150 g/l) + H_2O_2 (5 à 25 g/l) ou bien un bain sulfochromique comme H_2SO_4 (30 à 150 g/l) + $Na_2Cr_2O_7$ (30 à 150 g/l) à température ambiante.

6.6.2 Les traitements thermiques

Les recuits sont effectués entre 600 et 900 °C pour les cupro-nickels binaires ou avec addition de fer. La température de recuit nécessaire à la recristallisation est d'autant plus élevée que le taux de nickel est important. Les traitements de détente sont effectués entre

275 et 400 °C, pendant 2 à 3 heures. Les températures de travail à chaud se situent entre 800 et 1100 °C. Dans le cas du CuNi10Fe1Mn cette température doit être limitée à 900 °C. Les températures de mise en solution et de revenu pour les cupro-nickels à durcissement structural et à décomposition spinodale sont les suivantes :

Température de mise en solution et de revenu			
Alliage	CuNi3Si	CuNi14Al2	CuNi15Sn8
Température de mise en solution (°C)	780	925	850
Température de revenu* (°C)	440-480	525-550	360-370

*Valeur fonction de l'écrouissage.

6.6.3 L'usinage

Les cupro-nickels possèdent un indice d'usinabilité égal à 20, par rapport au laiton de décolletage CuZn39Pb2 pris pour base 100. L'usinage s'exécute comme celui des aciers. Les cupro-nickels sont des métaux "gras" à conductivité thermique limitée donnant des copeaux longs et tenaces.

6.6.4 Les méthodes d'assemblage

Les brasages tendres et forts conviennent parfaitement aux cupro-nickels.

Le soudage s'effectue facilement par tous les procédés classiques à condition que la présence d'impuretés soit limitée le plus possible pour éviter les risques de fissuration à chaud. Les procédés d'assemblage les mieux adaptés sont le soudage à l'arc sous argon avec électrode de tungstène (TIG), le soudage MIG, le soudage avec électrodes enrobées ainsi que le soudage par résistance électrique. Le soudage oxyacétylénique est relativement délicat et réservé aux faibles épaisseurs à cause des risques de porosités.