

Les alliages de cuivre aux béryllium



Les Alliages	3
Les nuances	4
Définition des semi-produits	5
Propriétés physiques	6
Les Produits	7
Feuillards	8
États de livraison	9
Mise en forme	11
Résistance à la relaxation sous contrainte	12
Fils	13
Barres et Tubes	15
Tôles et barres laminées Rectangulaires ou Carrées	17
Extrusions et Pièces Forgées	19
Lignes de Forage	20
Autres Produits et Services	21
Alliages Mère	21
Lingotins de fonderie	21
Feuillards en Nickel au Béryllium	21
Fabrications et services particuliers	21
Mise en Oeuvre	23
Principes de Traitement Thermique	24
Diagramme d'équilibre	24
Réactions au travail à froid	25
Revenu	26
Alliages à haute résistance	28
Alliages à haute conductibilité	28
Quelques microstructures	29
Décapage et Finition	30
Décapage	30
Galvanoplastie	30
Assemblage	31
Soudage tendre	31
Brasage	31
Soudage	32
Usinage	32
Dureté	33
Résistance à la fatigue	35
Résistance à la corrosion	36
Corrosion atmosphérique	36
Environnements marins	36
Environnements industriels	36
Autres Caractéristiques Particulières	37
Qui est Brush Wellman	39
Historique de la Société	39
Exploitation Minière et Fabrication	40
Usine d'Elmore	40
Usine de Reading	40
La Qualité	40



LES ALLIAGES

L'objet de cette brochure est de présenter les alliages de cuivre au béryllium que l'on trouve sous forme de produits ouvrés. On entend par produits ouvrés ceux dont la forme finale est obtenue par travail à chaud ou à froid plutôt que par fonderie.

Les nuances

Il existe deux grandes familles d'alliage cuivre-béryllium :

– Les alliages à haute résistance (25, 190, 290, M25 et 165).

– Les alliages à haute conductibilité (3, 10, 174).

Les compositions chimiques sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

L'ALLIAGE 25 est le plus couramment utilisé et il est disponible sous les formes indiquées dans le tableau page 5. A l'état revenu cet alliage offre la résistance et la dureté la plus élevée de tous les alliages de cuivre. La charge de rupture peut dépasser 1 400 N/mm² tandis que la dureté approche 45 Rockwell C. De plus, à l'état revenu, la conductibilité électrique minimale est de 22 % IACS (International Annealed Copper Standard). Cet alliage présente également d'exceptionnelles caractéristiques de résistance à la relaxation sous contrainte à haute température.

L'ALLIAGE 190 est un alliage revenu en usine fabriqué uniquement sous forme de feuillards. En d'autres termes, le feuillard est revenu jusqu'à un certain niveau de dureté avant livraison. Sa composition chimique est la même que celle de l'alliage 25.

Il est livré avec une résistance pouvant aller jusqu'à 1 300 N/mm² et une dureté de 42 Rockwell C. Des économies substantielles peuvent ainsi être réalisées par élimination des opérations de revenu et de décapage sur les pièces découpées.

L'ALLIAGE 290 (BRUSH FORM) est un alliage également revenu en usine, livré en feuillards, dont la composition est la même et les caractéristiques similaires à celles de l'alliage 190 mais dont la formabilité est améliorée. La fiabilité des composants, et les impératifs de production, peuvent en effet imposer un matériau alliant une bonne formabilité à des caractéristiques mécaniques élevées.

L'ALLIAGE M25 offre les mêmes caractéristiques mécaniques que l'alliage 25 avec une usinabilité améliorée. Cette nuance contient une petite addition de plomb le rendant particulièrement apte aux opérations d'usinage sur machines automatiques. Le plomb favorise en effet la formation de copeaux fins et cassants qui augmentent la durée de vie des outils de coupe.

L'ALLIAGE 165 contient moins de béryllium que l'alliage 25 et sa résistance est un peu moins élevée. Il peut lui être substitué lorsqu'on est moins exigeant sur la résistance et la formabilité. Cet alliage existe dans tous les états écrouis ou revenus en usine.

Composition chimique

(Pourcentage en poids)

Alliage	N° UNS	Béryllium	Cobalt	Nickel	Cobalt + Nickel	Cobalt + Nickel + Fer	Plomb	Cuivre
25								
190	C17200	1,80-2,00	–	–	0,20 min.	0,60 max.	–	complément
290								
M25	C17300	1,80-2,00	–	–	0,20 min.	0,60 max.	0,20-0,60	complément
165	C17000	1,60-1,79	–	–	0,20 min.	0,60 max.	–	complément
3	C17510	0,20-0,60	–	1,40-2,20	–	–	–	complément
10	C17500	0,40-0,70	2,40-2,70	–	–	–	–	complément
174	C17410	0,15-0,50	0,35-0,60	–	–	–	–	complément

Note: Cuivre + additions = 99,5% minimum.

Les ALLIAGES 3 et 10 offrent une limite élastique moyenne et une conductibilité électrique comprise entre 45 et 60 % de celle du cuivre pur. Ils sont disponibles sous toutes les formes (feuillards, barres, fils, etc.) et peuvent être livrés à l'état revenu. Les états revenus sont désignés par les appellations AT ou HT et ont une bonne formabilité.

L'ALLIAGE 174. L'alliage 174, qui a des caractéristiques meilleures que celles des laitons et des bronzes, permet aux utilisateurs d'améliorer les performances

de leurs produits particulièrement dans le domaine de la conductibilité et de la relaxation sous contrainte. Sa limite élastique peut atteindre 850 N/mm² ce qui est supérieur à celle des bronzes d'aluminium et des alliages cuivre-nickel-étain. L'alliage 174 a une conductibilité électrique 5 fois plus élevée que celle de ces alliages tandis que sa résistance à la relaxation sous contrainte est supérieure. Il est disponible sous forme de feuillards revenus en usine à l'état HT et 1/2 HT. Pour une charge de rupture légèrement inférieure, l'alliage 174 1/2 HT possède une meilleure formabilité.

Définition des semi-produits

Les alliages cuivre-béryllium sont disponibles sous des formes multiples. Les plus communes sont énumérées ci-dessous :

Les feuillards, sont des produits laminés, d'épaisseur inférieure à 4,76 mm et sont livrés en rouleaux.

Les fils, sont livrés en rouleaux ou sur bobines. Ils peuvent aussi être dressés et coupés à longueur.

Les fils aplatis ont une épaisseur inférieure à 4,76 mm pour une largeur maximale de 31,75 mm. Dans tous les cas, les surfaces sont laminées ou étirées sans refendage, cisailage ni sciage. Les fils aplatis sont livrables en longueurs droites ou en bobines.

Les barres rondes, hexagonales ou octogonales sont livrées soit en longueurs courantes de fabrication soit en longueurs fixes.

Les carrés et méplats de sections supérieures à 4,76 mm jusqu'à 300 mm de large sont des produits filés. Ils peuvent également être livrés sous forme de produits laminés s'ils sont obtenus à partir de tôles. Les rives peuvent être à angles vifs ou arrondies.

Les tôles sont des produits plats laminés d'une épaisseur supérieure à 4,76 mm et de plus de 300 mm de largeur.

Les tubes sont des produits creux sans soudure de forme ronde ou autre. Ils sont extrudés ou étirés et livrés en longueurs courantes de fabrication ou en longueurs fixes.

Les extrusions sont des sections solides autres que les ronds, hexagones, octogones ou méplats. Les formes sont élaborées sur mesure et livrées en longueurs droites.

Formes des produits

Forme	Alliages		
	25, 165 3, 10	M25	190, 290 174
Laminés à froid			
Feuillards	✓	-	✓
Fils plats	✓	-	-
Barres rectangulaires	✓	-	-
Carrés	✓	-	-
Tôles	✓	-	-
Étirés à froid			
Barres	✓	✓	-
Carrés, méplats	✓	✓	-
Tubes	✓	-	-
Fils	✓	✓	-
Profils	✓	-	-
Travaillés à chaud			
Barres	✓	-	-
Carrés, méplats	✓	-	-
Tôles	✓	-	-
Tubes	✓	-	-
Formes spéciales			
Barres tournées	✓	-	-
Billettes	✓	-	-
Pièces de forge	✓	-	-
Extrusions	✓	-	-

Les produits forgés, fabriqués à partir de billettes coulées sont livrés dans une gamme allant d'une forme géométrique simple à des configurations proches des formes terminées en fonction des spécifications des utilisateurs.

Il est possible de livrer des pièces finies ou ébauchées suivant les plans des utilisateurs. Ces fabrications utilisent des produits de base, barres, extrusions, tôles, etc. transformés par des procédés tels que le laminage circulaire, le forgeage, le soudage et l'usinage.

Propriétés physiques

Les propriétés physiques et les caractéristiques mécaniques des alliages cuivre-béryllium diffèrent considérablement de celles des autres alliages de cuivre à cause de la nature et de l'influence des éléments d'alliage en particulier du béryllium. Faire varier la teneur en béryllium dans des limites comprises entre 0,15 % et 2 % permet d'obtenir une variété d'alliages dont les caractéristiques physiques sont différentes. Les valeurs type de certaines de ces propriétés sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Qu'il s'agisse des alliages à haute résistance ou des alliages à haute conductibilité, certaines propriétés physiques restent similaires. Le module d'élasticité par exemple est de 131 000 N/mm² pour les alliages à haute résistance et de 138 000 N/mm² pour les alliages à haute conductibilité tandis que le coefficient de Poisson est le même pour tous (0,3). Une des caractéristiques qui diffère sensiblement d'une famille à l'autre est la conductibilité thermique qui va de 1,05 W/cm x °C pour les alliages à haute résistance à 2,39 W/cm x °C pour les alliages à haute conductibilité. Les conductibilités thermiques et électriques des alliages cuivre-béryllium favorisent l'emploi de ces alliages pour des applications nécessitant dissipation

de la chaleur et capacité de conduire le courant.

Le coefficient de dilatation thermique du cupro-béryllium est indépendant de la composition des divers alliages dans la gamme de température où on les utilise.

Ce coefficient est très proche de celui des aciers y compris des aciers inoxydables ce qui assure la compatibilité des deux matériaux dans un même assemblage.

La chaleur spécifique des cuivre-béryllium augmente avec la température. Pour les alliages 25, M25 et 165 elle est de 0,086 cal/gr x °C à la température ambiante et de 0,097 cal/gr x °C à 90°C. Pour les alliages 3, 10, 174 elle est de 0,080 et 0,091 cal/gr x °C aux mêmes températures.

La perméabilité magnétique est très proche de 1 ce qui veut dire que ces alliages sont presque transparents à des champs magnétiques à variation lente.

Les alliages à haute résistance sont moins denses que certains alliages cuivreux conventionnels permettant ainsi de fabriquer souvent plus de pièces par kilo de métal. Le module d'élasticité du cupro-béryllium est également 15 ou 20 % supérieur à celui des autres alliages cuivreux.

Propriétés physiques

Alliage	Densité g/cm ³	Module d'élasticité KN/mm ²	Coefficient de dilatation linéaire moyen de 20 à 200 °C (mm par °C)	Conductibilité thermique W/cm °C	Intervalle de fusion °C
25	8,36	131	17 x 10 ⁻⁶	1,05	870-980
M25	8,36	131	17 x 10 ⁻⁶	1,05	870-980
165	8,41	131	17 x 10 ⁻⁶	1,05	890-1000
3	8,83	138	18 x 10 ⁻⁶	2,40	1000-1070
10	8,83	138	18 x 10 ⁻⁶	2,00	1000-1070
174	8,80	138	18 x 10 ⁻⁶	2,30	1020-1070

Nota : les valeurs ci-dessus s'appliquent aux alliages revenus.
Avant revenu la densité est de 8,25 g/cm³ pour les alliages 25, M25, 165 et de 8,75 g/cm³ pour les alliages 3 et 10.



LES PRODUITS

Nous présenterons dans ce chapitre les propriétés électriques et mécaniques des alliages cuivre-béryllium. Les chiffres pourront aider à choisir l'état et les dimensions d'un produit mais ils ne constituent pas une limite car on demande fréquemment des plages de caractéristiques plus étroites ou des propriétés spéciales.

Les feuillards

Les feuillards en alliage cuivre-béryllium sont utilisés pour une large gamme d'applications. C'est ainsi qu'un ressort en cuivre au béryllium est souvent l'élément actif d'un dispositif conducteur de courant. Dans un connecteur, un contact en cuivre au béryllium règle la force d'insertion, fournit une force suffisante pour minimiser la résistance de contact et maintient la force d'extraction indispensable pour assurer l'intégrité du circuit conducteur.

Tout ceci nécessite souvent un contact découpé combinant rigidité et flexibilité pour la même pièce.

On retrouve d'autres avantages intéressants :

- Dans de nombreux états de livraison la résistance et l'aptitude à la mise en forme ne varient pas suivant la direction du laminage (isotropie). Les soufflets réalisés par emboutissage profond ou les diaphragmes ronds pour commandes pneumatiques dépendent, lors de leur fabrication et pendant leur durée de vie, des propriétés isotropiques des alliages.
- Les boucliers électromagnétiques nécessitent de bonnes caractéristiques de mise en forme alliées à une bonne résistance et à une bonne endurance.
- Les relais et contacts doivent supporter l'application de contraintes répétitives parfois à température modérément élevée et doivent par conséquent avoir une bonne résistance à la fatigue.
- Une dureté élevée est un atout dans les connecteurs auto-dénudants lorsqu'on doit traverser l'enveloppe isolante d'un fil pour maintenir un contact fiable. L'épaisseur est un élément critique dans la conception du ressort car elle influence fortement les caractéristiques de déflexion. C'est pour cela que la régularité de l'épaisseur est garantie dans la limite des tolérances indiquées dans le tableau ci-dessous.

Le sabrage et le tuilage sont également soigneusement contrôlés. Il est en effet indispensable d'avoir un excellent profil de bande pour le travail sur presse et en particulier avec les outils de découpe à suivre.

Spécifications

Alliage	N° UNS	Feuillard
25	C17200	ASTM B 194 QQ-C-533 AMS 4530, AMS 4532 SAE J 461, SAE J 463
165	C17000	ASTM B 194 QQ-C-533 SAE J 461, SAE J 463
190	C17200	ASTM B 194
290	C17200	ASTM B 194
3	C17510	ASTM B 534 MIL-C-81021 RWMA Classe 3
10	C17500	ASTM B 534 MIL-C-81021 SAE J 461, SAE J 463 RWMA Classe 3
174	C17410	ASTM B 768

ASTM American Society for Testing and Materials
QQ Federal Specification
MIL Military Specification
SAE Society of Automotive Engineers
AMS Aeronautical Materials Specifications
 (Published by SAE)
RWMA Resistance Welder Manufacturers' Association

Note : sauf indication contraire le métal est produit suivant norme ASTM

Tolérances sur Feuillards

(mm)

Epaisseur de	à (incl.)	Tolérances standard
		Brush Wellman en mm (+ ou -)
0,05	0,10	0,0038
0,10	0,20	0,006
0,20	0,30	0,008
0,30	0,70	0,010
0,70	1,0	0,016
1,0	1,3	0,020
1,3	2,0	0,025

États de livraison

Les propriétés des alliages de cuivre au béryllium dépendent pour partie de la composition chimique, mais l'écrouissage et le revenu jouent également un rôle important. Lorsqu'un alliage et un état sont spécifiés sur un dessin ou une commande, par exemple "Alliage 3 AT", l'utilisateur est assuré d'avoir une gamme définie de caractéristiques.

La définition des états est précisée dans les normes (NFA 51109 ou ASTM B601) mais des termes tels que "1/4 écroui" ou "1/4 dur" ou "1/2 dur" sont couramment utilisés par les fabricants et les utilisateurs. Les correspondances entre ces différentes appellations sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Dans leur état mis en solution, les alliages cuivre-béryllium sont désignés par la lettre "A" pour "Annealed", qui correspond en français à l'état trempé mou. Il s'agit de l'état le plus mou dans lequel l'alliage puisse se trouver. L'état "A" comporte une subdivision, en anglais "A Planished", correspondant à ce que de nombreux utilisateurs appellent en français 1/8 H ou encore "trempé glacé".

La lettre "H" pour "Hard" désigne un alliage ayant été durci par travail à froid tel que laminage ou étirage.

La lettre "T" pour "Heat Treated" suivant les lettres "A" ou "H" signifie que l'alliage a subi un traitement standard de revenu destiné à lui conférer ses caractéristiques maximales, par exemple 25 HT.

Enfin la présence de la lettre "M" pour "Mill Hardened" indique que le métal a été soumis en usine à un traitement particulier destiné à lui donner des caractéristiques s'inscrivant dans une fourchette spécifique et garantie.

Les alliages 3 et 10 sont disponibles à l'état trempé et revenu (AT) ou écroui et revenu (HT) ainsi, bien entendu, qu'à l'état trempé (A) et écroui (H). En revanche, il n'existent pas dans les états revenus en usine (M) sauf dans deux cas : l'un où l'on souhaite obtenir une résistance améliorée, l'alliage est alors livré à l'état "HTR", l'autre où l'on désire une conductibilité électrique maximale, l'alliage est alors livré à l'état "HTC".

Description des états

ASTM		Description des états			AFNOR	
États	Symbole ASTM	Description	Pourcentage de réduction par laminage à froid	État	Symbole AFNOR	Description
A	TB00	Mise en solution (trempé)	0	Non Revenu	TB	Trempé Mou
1/4 H	TD01	1/4 dur	11		TD 1	Trempé Glacé (1/8 dur)
1/2 H	TD02	1/2 dur	21		TD 2	1/4 dur
3/4 H	TD03	3/4 dur	29		TD 3	1/2 dur
H	TD04	4/4 dur	37		TD 4	Dur
AT	TF00	Le suffixe "T" indique que l'alliage a été vieilli par le traitement thermique de revenu standard.		États revenus en usine	TF	Ces états étant obtenus par des procédés propres à chaque fournisseur définissent un ensemble de caractéristiques et non un mode de fabrication.
1/4 HT	TH01				TH 1	
1/2 HT	TH02				TH 2	
3/4 HT	TH03				TH 3	
HT	TH04				TH 4	
AM	TM00	Le suffixe "M" indique que l'alliage a subi un revenu en usine.			TH 5	
1/4 HM	TM01					
1/2 HM	TM02					
HM	TM04	Aucun autre traitement thermique n'est nécessaire.				
SHM	TM05					
XHM	TM06					
XHMS	TM08					
HTR	—	Métal revenu en usine pour obtenir des caractéristiques particulières. Alliages 3 et 10 seulement.				
HTC	—					

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES ET ÉLECTRIQUES DES FEUILLARDS

Alliage	État	Traitement thermique de revenu	Charge de rupture en N/mm ² R	Limite élastique en N/mm ² E	Allongement* % A	Limite de fatigue N/mm ² 10 ⁶ cycles	Vickers**	DURETÉ		Conductivité électrique % IACS
								ROCKWELL		
								B ou C	Superficielle	
25 C17200	A	—	410-530	190-250	35-65	210-240	90-144	B45-78	30T46-67	15-19
	1/8H (tr. glacé)	—	410-540	200-380	35-60	210-240	90-144	B45-78	30T46-67	15-19
	1/4H	—	510-610	410-560	20-45	210-250	121-185	B68-90	30T62-75	15-19
	1/2H	—	580-690	510-660	12-30	220-260	176-216	B88-96	30T74-79	15-19
	H	—	680-830	620-800	2-18	240-270	216-287	B96-102	30T79-83	15-19
	AT	3 hr 315°C	1130-1350	960-1210	3-15	280-310	353-413	C36-42	30N56-62	22-28
	1/4 HT	2 hr 315°C	1200-1420	1030-1280	3-10	280-310	353-424	C36-43	30N56-63	22-28
	1/2 HT	2 hr 315°C	1270-1490	1100-1350	1-8	290-320	373-435	C38-44	30N58-63	22-28
	HT	2 hr 315°C	1310-1520	1130-1420	1-6	310-340	373-446	C38-45	30N58-65	22-28
	AM	M	680-760	480-660	16-30	280-310	210-251	B95-C23	30N37-44	17-28
190 C17200	1/4 HM	M	750-830	550-760	15-25	280-320	230-271	C20-26	30N41-47	17-28
	1/2 HM	M	820-940	650-870	12-22	290-330	250-301	C23-30	30N44-51	17-28
	HM	M	930-1040	750-940	9-20	310-360	285-343	C28-35	30N48-55	17-28
	SHM	M	1030-1110	860-970	9-18	320-380	309-363	C31-37	30N52-56	17-28
	XHM	M	1060-1210	930-1180	4-15	340-390	317-378	C32-38	30N52-58	17-28
	XHMS	M	1200-1320	1030-1250	3-12	340-410	325-413	C33-42	30N53-62	17-28
	TM00	M	680 min	510-670	19-35	280-310	225-309	B98-C31	30T81-30N52	17-26
	TM02	M	820 min	650-800	14-30	290-330	255-339	C25-34	30N46-54	17-26
290 C17200	TM04	M	960 min	790-940	9-25	300-340	285-369	C28-38	30N48-58	17-26
	TM06	M	1060 min	930-1070	6-13	320-390	317-393	C32-40	30N52-60	17-26
	TM08	M	1200 min	1060-1210	3-15	340-410	345-429	C35-43	30N55-62	17-26
	A	—	410-530	190-250	35-65	190-230	90-144	B45-78	30T46-67	15-19
	1/8H (tr. glacé)	—	410-540	200-380	35-60	190-230	90-144	B45-78	30T46-67	15-19
	1/4 H	—	510-610	410-560	20-45	200-230	121-185	B68-90	30T62-75	15-19
	1/2 H	—	580-690	510-660	12-30	220-260	176-216	B88-96	30T74-79	15-19
	H	—	680-830	620-800	2-10	240-270	216-287	B96-102	30T79-83	15-19
165 C17000	AT	3 hr 315°C	1030-1250	890-1140	3-20	260-290	325-373	C33-38	30N53-58	22-28
	1/4 HT	2 hr 315°C	1100-1320	930-1210	3-15	260-300	343-393	C35-40	30N55-59	22-28
	1/2 HT	2 hr 315°C	1170-1380	1030-1250	1-10	280-310	363-413	C37-42	30N57-60	22-28
	HT	2 hr 315°C	1240-1450	1060-1250	1-6	290-320	372-435	C38-44	30N58-63	22-28
	AM	M	680-760	480-660	18-30	280-310	225-251	B98-C23	30N37-44	18-33
	1/4 HM	M	750-830	550-760	15-25	280-310	230-271	C20-26	30N41-47	18-33
	1/2 HM	M	820-940	650-870	12-22	290-330	257-301	C24-30	30N44-51	18-33
	HM	M	930-1040	750-940	9-20	310-360	285-343	C28-35	30N48-55	18-33
	SHM	M	1030-1110	860-970	9-18	320-380	309-363	C31-37	30N52-56	18-33
	XHM	M	1060-1210	930-1140	3-10	340-390	317-378	C32-38	30N52-58	18-33
3 C17510 10 C17500	A	—	240-380	130-210	20-40	140-210	65-125	B20-45	30T28-45	20-30
	1/8H (tr. glacé)	—	240-380	170-320	20-40	140-210	65-125	B20-45	30T28-45	20-30
	H	—	480-590	370-560	2-10	170-240	144-176	B78-88	30T69-75	20-30
	AT	M ou 2-3 hr	680-900	550-690	10-25	260-300	195-275	B92-100	30T77-82	45-60
	HT	à 480°C	750-940	650-830	8-20	290-320	216-287	B95-102	30T79-83	48-60
174 C17410	HTR	M	820-1040	750-970	1-5	300-330	216-287	B98-103	30T80-84	48-60
	HTC	M	510-590	340-520	8-20	210-240	147-176	B79-88	30T69-75	60 mini
	HT	M	760-895	690-825	7-17	275-310	230-280	B95-C27	30T79-30N48	45-60
	1/2 HT	M	655-790	550-690	10-20	275-310	200-250	B93-C23	30N37-44	45-60

* Les valeurs d'allongement s'appliquent pour des épaisseurs supérieures à 0,10 mm.

** Les duretés vickers sont une conversion directe de l'échelle Rockwell.

Mise en forme

Le tableau ci-dessous constitue un guide pour le choix d'un état, en fonction d'une exigence de mise en forme. le rapport R/t indique le rayon de pliage (R) acceptable pour un pliage à 90 degrés en fonction de l'épaisseur du feuillard (t). Un rapport R/t faible indique donc une très bonne aptitude à la mise en forme. Celle-ci est excellente pour les états trempés, tant dans le sens

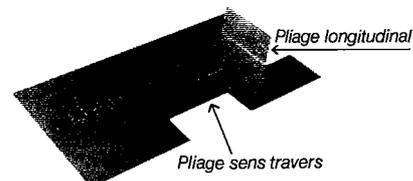
long que dans le sens travers. Certains états revenus en usine présentent également de faibles différences entre les deux sens. Grâce à cette isotropie, il n'est pas nécessaire, lors de la découpe, de tenir compte du sens de laminage. Dans de nombreux cas, cela permettra d'utiliser le métal dans les meilleures conditions.

Formabilité

Niveau de formabilité	Alliage et états de livraison	Alliages non revenu Rapport R/t pour pliage à 90°		Alliages à l'état revenu Rapport R/t pour pliage à 90°		
		Sens long	Sens travers	Sens long	Sens travers	
Excellent	Utilisation pour l'emboutissage profond	3A	0			
		10A	0			
		165A	0			
		25A	0			
	Pratiquement aussi formable que l'état trempé mais plus facile à découper	165 1/4 H	0	0	290 TM00	0
	25 1/4 H	0	0	290 TM02	0	
Très bon	Convient pour l'emboutissage léger	3H	0,5	0,6	190 AM	0,8
		10H	0,5	0,6	190 1/4 HM	1,0
		165 1/2 H	0,5	1,0	3, 10 AT	1,0
		25 1/2 H	0,5	1,0	3, 10 HTC	1,0
					165 AM	1,0
					290 TM04	1,0
Bon	Possibilité de pliage à 90° suivant un rayon inférieur à trois fois l'épaisseur du feuillard	25H	1,0	2,9	174 1/2 HT	1,0
		165H	1,0	2,9	190 1/2 HM	1,3
					165 1/4 HM	1,5
					165 1/2 HM	1,9
					3, 10 HT	2,0
					190 HM	2,5
Modéré	Aptitude réduite à la mise en forme Utilisation pour les ressorts				290 TM06	2,5
					174 HT	1,2
					190 SHM	2,8
					3, 10 HTR	2,8
					190 XHM	3,0
Réduit	Essentiellement pour les pièces plates. le pliage requiert de très grands rayons de poinçon				290 TM08	3,5
					165 HM	3,8
					190 XHMS	4,1
					165 SHM	5,0
			165 XHM	6,1		
				10,4		

N.B. : les ratios de formabilité sont valables pour des feuillards dont l'épaisseur est inférieure à 1,25 mm. Les feuillards de moins de 0,25 mm d'épaisseur ont une aptitude au pliage plutôt meilleure. Les valeurs indiquées sont égales à la valeur du plus petit rayon utilisable pour plier un feuillard à 90° dans un V sans faire apparaître de fissure.

R = Rayon de pliage t = Épaisseur du feuillard



Résistance à la relaxation sous contrainte

Les outillages utilisés pour la découpe et l'emboutissage des alliages de cuivre au béryllium sont les mêmes que ceux que l'on utilise pour n'importe quel autre alliage de cuivre de dureté semblable. Ces outils devront être affûtés avec un jeu d'environ 5 % de l'épaisseur du feuillard (ou 2,5 % de chaque côté). Cette pratique diminuera les bavures qui se forment à la découpe. Ces bavures devront être éliminées avant le revenu car elles sont à l'origine d'amorces de rupture sur des pièces fortement sollicitées. Les angles de dépouille devront être supérieurs d'environ un demi degré de chaque côté, à ceux que l'on utilise pour les bronzes phosphoreux ou les laitons, afin d'empêcher le cuivre au béryllium de remonter sur le poinçon, ce qui pourrait modifier les jeux de poinçon. Il faut noter que la lubrification prolonge la vie des outils mais que les lubrifiants contenant du soufre tachent les cupro-béryllium.

Quant à l'effet ressort, il est d'autant plus prononcé que la résistance est plus élevée. Cet effet peut être contrôlé par une augmentation des angles de pliage pour obtenir l'angle désiré. Pour un rayon de pliage donné, l'effet ressort décroît lorsque l'épaisseur du feuillard augmente.

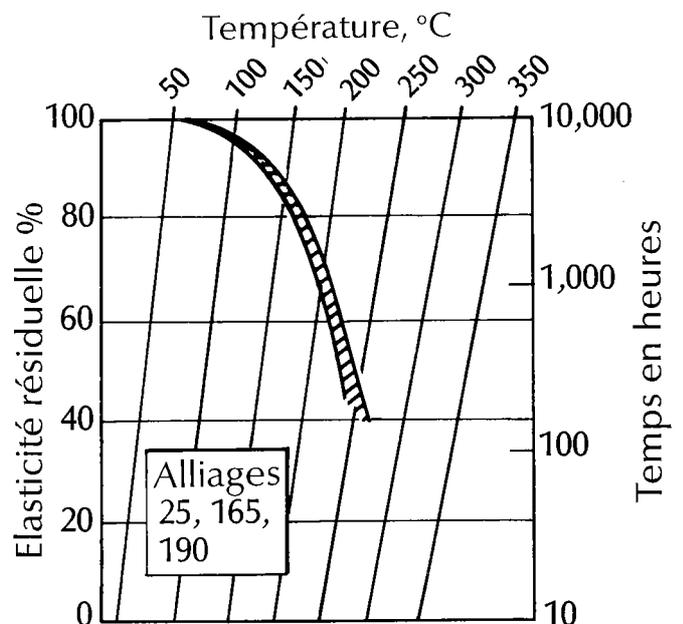
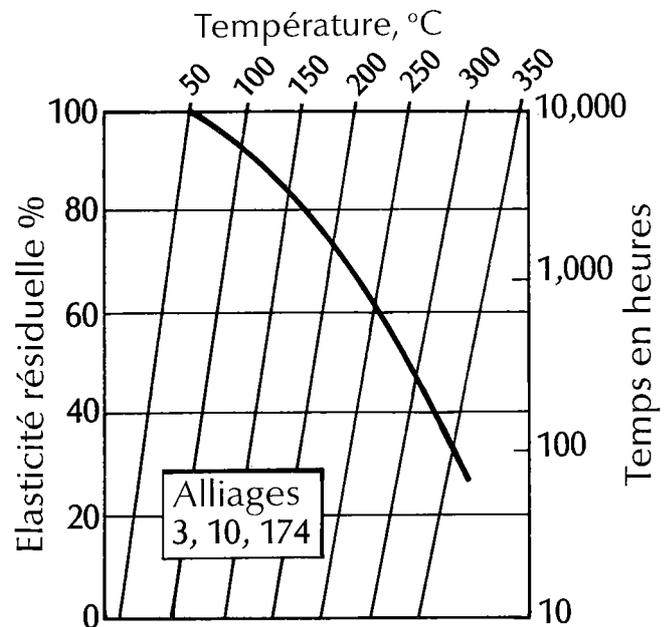
Résistance à la relaxation sous contrainte

Les alliages cuivre-béryllium sont souvent choisis pour leur bonne résistance à la relaxation sous contrainte. La miniaturisation des composants dans l'informatique, l'automobile et l'aérospatial a mis l'accent sur l'importance d'une grande stabilité thermique. De nos jours, de nombreux contacts électroniques et autres éléments ressorts doivent rester stables plus longtemps, alors qu'ils travaillent à plus haute température.

Cette propriété est généralement mesurée sur un échantillon de feuillard sous contrainte de flexion constante à température modérément élevée. Une des méthodes les plus utilisées consiste à fixer l'échantillon dans un montage en le soumettant à une contrainte initiale de 75 % de la limite élastique à 0,2 %. L'ensemble est soumis à une température déterminée durant une longue période de temps, 1 000 heures ou plus.

La relaxation sous contrainte provoque une déformation permanente. Le rapport entre la valeur de cette déformation permanente et la déflexion initiale indique l'importance de la perte d'élasticité initiale causée par la relaxation.

La résistance à la relaxation sous contrainte des différents alliages est indiquée sur les courbes ci-contre. Le pourcentage d'élasticité résiduelle après exposition, est fonction du temps et de la température. Par la méthode de Larson-Miller, on peut extrapoler sur une large gamme les valeurs de ces paramètres.



Fils

Les fils constituent l'une des familles de produits les plus intéressantes, avec une gamme d'applications extrêmement variée. Citons par exemple :

- Les ressorts hélicoïdaux
- Les douilles miniatures obtenues par usinage (Sockets)
- Les boulonneries réalisées en frappe à froid
- Les câbles toronés
- Les écrans tressés
- Les fils résistants à la corrosion marine et les fils maillés
- Les montures de lunettes.

On peut livrer des fils sous diverses formes autres que rondes. Les profils spéciaux jouent un rôle important dans diverses applications particulières. On utilise par exemple, du fil plat pour des antennes rétractables, ou en lieu et place de feuillard refendu ce qui élimine les bavures.

Le fil carré est utilisé dans certains contacts électroniques, en particulier si des angles vifs sont nécessaires pour favoriser un bon contact dans le cas d'un fil enroulé. Parfois aussi, on recherche des fils carrés ou rectangulaires avec un angle biseauté. Les fils sont livrables dans des dimensions comprises entre 1,30 et 12,7 mm, aux tolérances indiquées dans le tableau. De plus petites dimensions devront faire l'objet d'une fabrication spéciale.

Les états de livraison sont l'état trempé (mou), 1/4 dur, 1/2 dur, ou dur. Dans certains cas, on peut envisager de livrer du fil pré-revenu pour des applications où la mise en forme n'est pas un critère trop contraignant.

Spécifications

Alliage	N° UNS	Fils
25	C17200	ASTM B 197 QQ-C-530 AMS 4725 SAE J 461, SAE J 463
M25	C17000	ASTM B 197 QQ-C-530
3	C17510	*
10	C17500	*

Tolérances sur Fils (mm)

Diamètre Supérieur à	à (incl.)	Tolérances standard Brush Wellman (+ ou -)	
		Étirés	Trempés
1,2	1,5	0,01	0,03
1,5	2,0	0,01	0,03
2,0	3,8	0,02	0,05
3,8	12	0,03	0,05

ASTM American Society for Testing and Materials
QQ Federal Specification
SAE Society of Automotive Engineers
AMS Aeronautical Materials Specification
RWMA Resistance Welder Manufacturers' (Published by SAE)
Note : sauf indication contraire le produit est fabriqué suivant norme ASTM.
 *Produit pour lequel une spécification est en cours de préparation.

Caractéristiques mécaniques et électriques des Fils

Alliage	État*	Traitement thermique de revenu	Diamètre du fil	Charge de rupture	Limite élastique	Allongement % A	Conductivité électrique % IACS
				N/mm ² R	N/mm ² E		
25 C17200 M25 C17300	A (TB00)	—	1,3-12,7	410-540	130-210	30-60	15-19
	1/4 H (TD01)	—	1,3-12,7	620-800	510-730	3-25	15-19
	1/2 H (TD02)	—	1,3-12,7	750-940	620-870	2-15	15-19
	3/4 H (TD03)	—	1,3-2,0	890-1070	790-1040	2-8	15-19
	H (TD04)	—	1,3-2,0	960-1140	890-1110	1-6	15-19
	AT (TF00)	3 hr 315-330°C	1,3-12,7	1100-1380	990-1250	3 min	22-28
	1/4 HT (TH01)	2 hr 315-330°C	1,3-12,7	1200-1450	1130-1380	2 min	22-28
	1/2 HT (TH02)	1,5 hr 315-330°C	1,3-12,7	1270-1490	1170-1450	2 min	22-28
	3/4 HT (TH03)	1 hr 315-330°C	1,3-2,0	1310-1590	1200-1520	2 min	22-28
	HT (TH04)	1 hr 315-330°C	1,3-2,0	1340-1590	1240-1520	1 min	22-28
3 C17510 10 C17500	A (TB00)	—	1,3-12,7	240-380	60-210	20-60	20-30
	H (TD04)	—	1,3-12,7	440-560	370-520	2-20	20-30
	AT (TF00)	3 hr 480-495°C	1,3-12,7	680-900	550-760	10 min	45-60
	HT (TH 04)	2 hr 480-495°C	1,3-12,7	750-970	650-870	10 min	48-60

* Désignation alphanumérique ASTM.

Barres et tubes

Des longueurs pouvant atteindre 9 mètres, et des sections allant jusqu'à plus de 230 mm de diamètre sous forme de barres étirées ou extrudées; la gamme de ces produits est très étendue.

Citons parmi les principales applications des barres et des tubes, les paliers et manchons ne nécessitant pas d'entretien, des composants de pistolets de soudure, les noyaux et inserts entrant dans la fabrication des moules pour l'injection des matières plastiques et la coulée de métal sous pression, les plaques antigrippage, la boulonnerie décollée, etc.

Les tubes existent dans une large gamme de dimensions allant des tubes rétirés à parois ultra-minces aux gros tubes extrudés à chaud, en passant par les tubes

étirés à froid. On les utilise pour la fabrication des tubes de Bourdon et de Pitot, pour la réalisation de paliers et de parties pivotantes de trains d'atterrissage, de tricônes de forage, d'enveloppes de pression pour magnétomètres de précision, et autres instruments.

Les barres et tubes en cupro-béryllium sont largement utilisés pour la fabrication des électrodes de soudure par résistance, car cet alliage répond à la nécessité d'avoir une bonne dureté alliée à une conductibilité électrique suffisante garantissant la durée d'utilisation des électrodes. Les facilités de pliage et d'usinage contribuent à la rentabilité de cette application.

Les tubes et les barres peuvent être livrés à l'état revenu. On les trouve aussi à l'état trempé et trempé revenu, et à l'état écroui ou écroui revenu.

Spécifications

Alliage	N° UNS	Barres et Tubes	Tolérances sur Barres et Tubes (mm)			
			Produits	Diamètre ou distance entre faces parallèles de à (incl.)	Tolérance standard Brush Wellman (+ ou -)	
25	C17200	ASTM B 196, 251, 643	Barres rondes étirées (diamètre)	3,8 12 25 50	12 25 50 75	0,05 0,08 0,10 0,2 % du diamètre
		QQ-C-530 MIL-C-21657 SAE J 461, SAE J 463 AMS 4650, AMS 4651 RWMA Classe 4				
M25	C17300	ASTM B 196 QQ-C-530 MIL-C-21657				
165	C17000	ASTM B 196	Barres hexagonales étirées (entre plats)	3,8 12 25 50	12 25 50 75	0,08 0,10 0,13 0,2 % du diamètre
		SAE J 461, SAE J 463 RWMA Classe 4				
3	C17510	ASTM B 441 SAE J 461, SAE J 463 RWMA Classe 3				
10	C17500	ASTM B 441	Barres rondes extrudées (diamètre)	20 30 60	30 60 150	0,50 0,75 1,50
		SAE J 461, SAE J 463 RWMA Classe 3				

ASTM American Society for Testing and Materials
QQ Federal Specification
MIL Military Specification
SAE Society of Automotive Engineers
AMS Aeronautical Materials Specification (Published by SAE)
RWMA Resistance Welder Manufacturers' Association

Note : sauf indication contraire le métal est produit suivant norme ASTM.

Caractéristiques mécaniques et électriques des Barres et des Tubes .

Alliage	État*	Traitement thermique de revenu	Diamètre extérieur ou entre plats (en mm)	Charge de rupture N/mm ² R	Limite élastique N/mm ² E	Allongement % A	Dureté Rockwell B ou C	Conductibilité électrique % IACS
25 C17200	A (TB00)		Toutes dimensions	410-590	130-250	20-60	B45-85	15-19
			jusqu'à 9,5	620-900	510-730	8-30	B92-103	15-19
	H (TD04)		> 9,5 à 25,4	620-870	510-730	8-30	B88-102	15-19
			> 25,4 à 51	580-830	510-730	8-20	B88-101	15-19
			> 51 à 76	580-830	510-730	8-20	B88-101	15-19
	AT (TF00)	3 hr 315-330°C	Toutes dimensions	1130-1380	890-1210	3-10	C36-41	22-28
			Jusqu'à 9,5	1270-1560	1100-1380	2-9	C39-45	22-28
			> 9,5 à 25,4	1240-1520	1060-1350	2-9	C38-44	22-28
	HT (TH04)	2-3 hr 315-330°C	> 25,4 à 51	1200-1490	1030-1320	4-9	C37-44	22-28
			> 51 à 76	1200-1490	990-1280	4-9	C37-44	22-28
	165 C17000	A (TB00)		Toutes dimensions	410-590	130-250	20-60	B45-85
Jusqu'à 9,5				620-900	510-730	8-30	B92-103	15-19
H (TD04)			> 9,5 à 25,4	620-870	510-730	8-30	B91-102	15-19
			> 25,4 à 51	580-830	510-730	8-20	B88-101	15-19
			> 51 à 76	580-830	510-730	8-20	B88-101	15-19
AT (TF00)		3 hr 315-330°C	Toutes dimensions	1030-1320	860-1070	3-10	C32-39	22-28
			Jusqu'à 9,5	1170-1450	990-1280	2-5	C35-41	22-28
			> 9,5 à 25,4	1170-1450	990-1280	2-5	C35-41	22-28
HT (TH04)		2-3 hr 315-330°C	> 25,4 à 51	1130-1380	960-1250	2-5	C34-39	22-28
			> 51 à 76	1130-1380	930-1210	2-6	C34-39	22-28
3 C17510 et 10 C17500		A (TB00)		Toutes dimensions	240-380	60-210	20-35	B20-50
	H (TD04)		Jusqu'à 76	440-560	340-520	10-15	B60-80	20-30
	AT (TF00)	3 hr 480°C	Toutes dimensions	680-900	550-690	10-25	B92-100	45-60
	HT (TH04)	2 hr 480°C	Jusqu'à 76	750-970	650-870	5-25	B95-102	48-60

* Désignation alphanumérique ASTM.

Tôles et barres laminées, rectangulaires ou carrées

Les tôles sont des produits plats laminés d'une épaisseur supérieure à 4,76 mm et dont la largeur est supérieure à 300 mm. Les barres sont des produits laminés de section rectangulaires ou carrées, meulées ou sciées dans de la tôle.

Ces produits sont disponibles à l'état trempé ou écroui par laminage à froid, et à l'état revenu sur métal trempé (état AT) ou écroui (HT). Le choix de l'état dépend de l'application et du processus de fabrication. Avec l'alliage 25 par exemple, on utilisera l'état trempé lorsqu'on aura à percer des trous de petits diamètres, le revenu étant effectué après perçage. Les alliages à l'état revenu seront eux utilisés lorsqu'on pourra, grâce à des outils plus rigides, effectuer des passes plus profondes. Si l'on sélectionne un état trempé (A) ou écroui (H), on procédera d'abord à un usinage ébauche pour compenser le léger changement de dimension qui intervient au revenu ;

la finition étant effectuée après le revenu.

Ces produits sont intéressants pour leur stabilité dimensionnelle tant lors des opérations d'usinage que pendant leur utilisation.

Parmi les applications caractéristiques on peut citer :

pour les tôles ;

- Les boîtiers de refroidissement pour ordinateurs
- Les moules pour injections de matières plastiques
- Les composants d'appareillages de soudure par résistance

pour les barres ;

- Les plaques d'usure et les bandes de frottement
- Les outillages anti-déflagrants
- Les inserts de moules à injection et des éléments de moulage en coquille.

Spécifications

Alliage	N° UNS	Tôles et barres laminées (carrées ou méplates)
25	C17200	ASTM B 194 QQ-C-530 SAE J 461, SAE J 463 AMS 4530 AMS 4650 AMS 4651 RWMA Classe 4
165	C17000	ASTM B 194 SAE J 461, SAE J 463 RWMA Classe 4
3	C17510	ASTM B 534 SAE J 461, SAE J 463 RWMA Classe 3
10	C17500	ASTM B 534 SAE J 461, SAE J 463 RWMA Classe 3

ASTM	American Society for Testing and Materials
QQ	Federal Specification
MIL	Military Specification
SAE	Society of Automotive Engineers
AMS	Aeronautical Materials Specification (Published by SAE)
RWMA	Resistance Welder Manufacturers' Association

Note : sauf indication contraire le métal est produit suivant norme ASTM.

Tolérances sur Tôles et Barres laminées (carrées ou méplates)

(mm)

Epaisseur de	à (incl.)	Tolérances standard Brush Wellman	
		plus	ou moins
5,0	8,0	0,30	0
8,0	13,0	0,40	0
13,0	20,0	0,50	0
20,0	25,0	0,60	0
25,0	40,0	0,70	0
40,0	75,0	0,85	0

Nota : les tolérances s'appliquent aux largeurs inférieures à 24 inches (610 mm)

Caractéristiques mécaniques et électriques des Tôles et Barres laminées (carrées ou méplates)

Alliage	État*	Traitement thermique de revenu	Diamètre extérieur ou entre plats (en mm)	Charge de rupture N/mm ² R	Limite élastique N/mm ² E	Allongement % A	Dureté Rockwell B ou C	Conductivité électrique % IACS	
25 C17200	A (TB00)	3 hr 330°C	Toutes dimensions	410-590	130-210	20-60	B45-85	15-19	
			jusqu'à 9,5	620-900	510-730	8-20	B92-103	15-19	
	H (TD04)		> 9,5 à 25	620-870	510-730	8-20	B91-102	15-19	
			> 25 à 51	580-830	510-730	8-20	B88-101	15-19	
			> 51 à 76	580-830	510-730	8-20	B88-101	15-19	
	AT (TF00)		Toutes dimensions	1130-1380	890-1210	3-10	C36-41	22-28	
			Jusqu'à 9,5	1270-1560	1100-1380	1-5	C39-45	22-28	
			HT (TH04)	> 9,5 à 25	1240-1520	1060-1380	1-5	C38-44	22-28
	> 25 à 51			1200-1490	1030-1380	2-5	C37-43	22-28	
	> 51 à 76			1200-1450	890-1250	2-5	C37-42	22-28	
165 C17000	A (TB00)	3 hr 330°C	Toutes dimensions	410-590	130-210	20-60	B45-85	15-19	
			Jusqu'à 9,5	620-900	510-730	8-20	B92-103	15-19	
	H (TD04)		> 9,5 à 25	620-870	510-730	8-20	B91-102	15-19	
			> 25 à 51	580-830	510-730	8-20	B88-101	15-19	
			> 51 à 76	580-830	510-730	8-20	B88-101	15-19	
	AT (TF00)		Toutes dimensions	1030-1320	890-1070	3-10	C32-39	22-28	
			Jusqu'à 9,5	1170-1450	930-1140	2-5	C35-41	22-28	
			HT (TH04)	> 9,5 à 25	1170-1450	930-1140	2-5	C35-41	22-28
	> 25 à 51			1130-1380	930-1140	2-5	C34-39	22-28	
	> 51 à 76			1100-1320	860-1070	2-5	C34-38	22-28	
3 C17510 et 10 C17500	A (TB00)	3 hr 480°C	Toutes dimensions	240-380	170-320	20-35	B20-50	20-30	
	H (TD04)		Jusqu'à 76	480-590	370-560	2-8	B78-88	20-30	
			AT (TF00)	Toutes dimensions	680-900	550-690	8-20	B92-100	45-60
	HT (TH04)			Jusqu'à 76	750-970	680-830	5-15	B95-102	48-60

* Désignation alphanumérique ASTM.

Extrusions et pièces forgées

La facilité avec laquelle on peut travailler les alliages de cuivre au béryllium permet la réalisation de pièces de grandes dimensions, proches des cotes finies, par forgeage ou extrusion.

Le forgeage élargit la gamme des dimensions disponibles, les procédés utilisés étant notamment le laminage et le forgeage circulaire, le matriçage à froid, le refoulage, et diverses techniques de forgeage libre et d'estampage.

Les applications les plus courantes sont :

- Les électrodes circulaires pour soudure à la molette
- Les anneaux de générateurs
- Les composants pour l'aérospatial et l'océanographie
- Les éléments de transmissions, etc.

Les extrusions sont utilisées si l'on a besoin de grandes longueurs avec des dimensions proches des cotes finies, ou dans le cas de longueurs plus courtes produites à grande échelle, ou encore, lorsqu'on veut réaliser économiquement des pièces ayant un grand diamètre intérieur.

Une des applications les plus connues, est la fabrication de cylindres pour la réalisation d'enveloppes de répéteurs de câbles sous-marins, mais il faut mentionner aussi les éléments de moules résistant à la fatigue et à la température utilisés dans des équipements de coulée continue, les rails-guide résistant

à l'usure pour des équipements périphériques d'ordinateurs, etc.

Spécifications

Alliage	N° UNS	Pièces forgées et extrusions
25	C17200	ASTM B 570 QQ-C-530 SAE J 461, SAE J 463 AMS 4650 RWMA Classe 4
		ASTM B 570 SAE J 461, SAE J 463 RWMA Classe 4
165	C17000	ASTM B 570 SAE J 461, SAE J 463 RWMA Classe 4
3	C17510	RWMA Classe 3
10	C17500	SAE J 461, SAE J 463 RWMA Classe 3

ASTM American Society for Testing and Materials
QQ Federal Specification
SAE Society of Automotive Engineers
AMS Aeronautical Materials Specification
RWMA Resistance Welder Manufacturers' Association

Nota : sauf indication contraire le métal est produit suivant norme ASTM.

Caractéristiques mécaniques et électriques des pièces forgées et extrudées

Alliage	État	Traitement thermique de revenu	Charge de rupture N/mm ² R	Limite élastique N/mm ² R	Allongement % A	Dureté Rockwell B ou C	Conductibilité électrique % IACS
25 C17200	A (TB00)		410-590	130-280	35-60	B45-85	15-19
	AT (TF00)	3 hr 330°C	1130-1320	890-1210	3-10	C36-42	22-28
165 C17000	A (TB00)		410-590	130-280	35-60	B45-85	15-19
	AT (TF00)	3 hr 330°C	1030-1250	860-1070	4-10	C32-39	22-28
3 C17510 et 10 C17500	A (TB00)		240-380	130-280	20-35	B20-50	20-35
	AT (TF00)	3 hr 480°C	680-830	550-690	10-25	B92-100	45-60

Composants de lignes de forage

Une nuance particulière de cuivre au béryllium a été développée pour répondre aux besoins spécifiques de l'industrie pétrolière. Les composants utilisés dans cet environnement exigeant sont, par exemple, des éléments de l'extrémité de la ligne de forage renfermant les instruments de mesure des propriétés magnétiques. Ces éléments tubulaires doivent être transparents aux champs magnétiques, avoir une bonne tenue à la corrosion, et offrir une résistance suffisante aux contraintes de torsion subies par les raccords filetés tout en étant suffisamment solides pour supporter les contraintes de rotation et flexion consécutives à l'utilisation en zones de profondeur.

La nuance 25 pour ligne de forage (Drill string temper) répond à ces exigences avec de plus, une remarquable aptitude à diminuer l'effet de grippage au niveau des raccords filetés. Cet alliage résiste à la corrosion sous tension par les chlorures. Il n'est pas sensible à la fragilisation par l'hydrogène et résiste

au dioxyde de carbone (gaz carbonique). On l'utilise pour les forages et le carottage en milieu acide, lorsqu'il y a une exposition intermittente.

Il a une faible perméabilité magnétique (entre 0,997 et 1,003) qui ne change pas, même en cas de sévères conditions d'utilisation ; il s'usine facilement et résiste au grippage sans qu'il soit besoin de recourir à des traitements ou revêtements spéciaux.

Ce métal répond aux exigences dimensionnelles de l'American Petroleum Institute Spec 7 pour les massetiges (drill collars) et les éléments rotatifs de rechange. Les caractéristiques figurent dans les tableaux ci-dessous.

Nous pouvons livrer des éléments cylindriques avec extrémités filetées ou non. Citons comme types d'applications dans le domaine des lignes de forage :

- Les masses tiges amagnétiques
- Les tiges de forage pour carottage
- Les enveloppes pour instruments de mesure
- Les stabilisateurs amagnétiques.

Résistance à la corrosion sous tension en milieu chloré

Température °F	300	311	300
Contrainte appliquée en % de la limite élastique à 0,2 %	100	100	100
Oxygène contenu (parties par million gaz saturé)	1*	1	5000*
pH	8	3	7
Concentration en chlorure (en % de poids)			
sodium	3	0	0
potassium	10	0	6
magnésium	0	42	25
Durée de l'essai (heures)	720	1000	1000
Résultat	Pas de fissure	Pas de fissure	Pas de fissure

* Pression totale 1000 psi

Caractéristiques mécaniques des masse-tiges en alliage cuivre-béryllium

Diamètre extérieur en pouces	Charge de rupture minimum R en ksi	Limite élastique minimum E en ksi	Allongement minimum %
3-1/2 - 6-7/8	140	110	12
7 - 11	135	100	13
over 11	120	90	13

Nota : essais effectués suivant ASTM E 8
Limite élastique à 0,2 %

Résistance au grippage d'un joint fileté

Couple Pièce mâle/ Pièce femelle	Point de rupture par grippage % du moment de torsion minimum suivant API	
	Lubrifié	Non lubrifié
Ac. Inox/Ac. Inox ¹	130	< 100
Alliage 25/Ac. Inox ²	NF à 180	—
Alliage 25/Ac. Inox ¹	NF à 200	200
Alliage 25/AISI 4140 ²	NF à 205	—
Alliage 25/Alliage 25 ¹	NF à 200	NF à 200

¹ API 3 - 1/2 IF

² API 6 - 5/8 REG

NF - Pas de rupture

Autres produits et services

Outre les semi produits dont nous avons déjà parlé, il existe une gamme complète d'alliages de fonderie et toute une série de services particuliers.

Alliages mère

Les alliages mère classiques comprennent les alliages cuivre-béryllium à 4 % de béryllium, les alliages aluminium-béryllium à 5 % de béryllium et l'alliage nickel-béryllium à 6 % de béryllium. Ils sont livrés en lingotins ou en grenailles. Ces alliages sont utilisés pour désoxyder et désulfurer le cuivre et le nickel pour durcir le cuivre, le nickel et l'aluminium, pour améliorer la propreté, la fluidité et la résistance à la corrosion de l'aluminium, pour réduire les pertes d'éléments oxydables, tel que le magnésium, dans l'aluminium, comme protection contre l'oxydation et l'inflammation lors de la fusion du magnésium, et enfin pour contrôler la composition lors de l'élaboration des divers alliages commerciaux contenant du béryllium.

Lingotins de fonderie

Les alliages cuivre-béryllium de fonderie sont disponibles en diverses nuances à haute résistance ou haute conductibilité, sans autres additions. On les utilise dans les opérations de coulées en sable ou en cire perdue, pour la coulée sous pression ou par centrifugation. La présence de béryllium dans le cuivre augmente la fluidité du mélange et la propreté, tout en permettant d'obtenir un produit durcissable par traitement thermique. La reproduction des détails par moulage est excellente. A l'état revenu, la dureté accroît la longévité, la conductibilité, permet une bonne régulation thermique, tandis que la facilité

d'usinage assure une finition économique. Pour ces diverses raisons, les produits coulés sont utilisés, par exemple, pour la production de clubs de golf ou d'éléments de moules pour reproduire des décors sur des éléments en plastique injecté, voire la fabrication d'aubes creuses de réacteurs.

Fabrications et services particuliers

Pour répondre à des spécifications particulières, il est possible de réaliser en usine certaines opérations telles que le trancanage, le redressage sous traction, la coupe à longueur, ou l'étamage des feuillards.

Il convient de nous consulter chaque fois qu'un problème particulier se pose pour la réalisation d'une fabrication "sur mesure".

Feuillards en nickel au béryllium ⁽¹⁾

Ces feuillards sont utilisés pour des applications à des températures allant jusqu'à 370 °C. L'alliage à l'état revenu offre une résistance proche de 2 100 N/mm². Il est disponible à l'état écrouï ou revenu en usine avec une aptitude au formage excellente.

On les utilise pour des raccords, des rondelles belleville, et des composants soumis à de sévères contraintes d'utilisation.

(1) Il existe une documentation particulière sur ces alliages.





MISE EN ŒUVRE DES ALLIAGES CUIVRE-BERYLLIUM

Principes des traitements thermiques

Il faut garder à l'esprit que la composition, le travail à froid et les processus thermiques réagissent les uns sur les autres pour synthétiser les propriétés des cupro-béryllium, tandis que les microstructures seront déterminantes pour la conception et la mise en œuvre de ces alliages.

De petites additions de béryllium dans le cuivre mises en valeur par des processus mécaniques et thermiques, permettent d'obtenir des propriétés mécaniques dépassant largement celles de la plupart des alliages à base de cuivre, et de beaucoup d'aciers trempés. De plus, en contrôlant les opérations de transformation à froid, et en utilisant des processus spécifiques de traitement thermique, on peut obtenir des caractéristiques "sur mesure" permettant de répondre à un grand nombre d'applications. Ces propriétés fondamentales vont être explorées dans les pages suivantes.

Diagrammes d'équilibre

Le diagramme d'équilibre binaire montre quel est à peu près le comportement des alliages à haute résistance. Étant donné que ces alliages contiennent jusqu'à 0,6 % en poids de cobalt et de nickel en plus du béryllium, le diagramme binaire n'est pas rigoureusement représentatif, mais il permet de comprendre le comportement des alliages.

A des concentrations de 1,6 à 2 % de béryllium en poids, un constituant riche en béryllium appelé phase

γ (gamma) est présent en-dessous de 600 °C. Cette phase est le résultat de la solubilité solide limitée du béryllium. C'est la première contribution au phénomène de précipitation.

Le diagramme binaire montre qu'en chauffant au-dessus de 705 °C, on provoque la dissolution du béryllium dans une phase solide appelée phase α (alpha). Une trempe à l'eau rapide jusqu'à la température ambiante retient le béryllium en solution solide. Ce processus appelé mise en solution (ou trempe) rend l'alliage mou et ductile, aide à contrôler la grosseur du grain, et prépare l'opération de revenu. La trempe étant une partie intégrante du processus d'élaboration, les utilisateurs n'effectuent presque jamais cette opération.

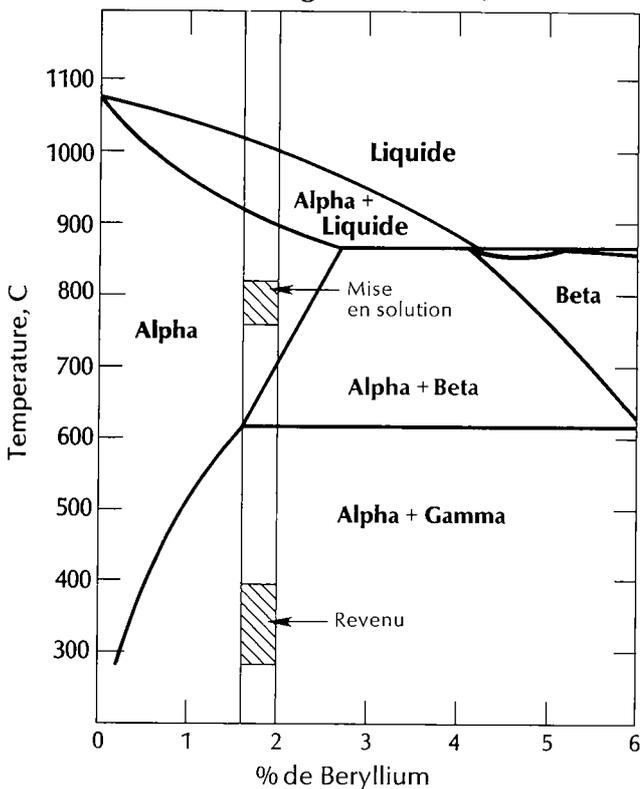
Si l'on chauffe la solution solide sursaturée pendant deux ou trois heures à 315 °C, on provoque une précipitation entraînant le durcissement de l'alliage.

Le diagramme binaire montre qu'à 870 °C la limite de solubilité est d'environ 2,7 % de Be dans le cuivre (l'addition du cobalt la réduisant à environ 2,3 %). A la température ambiante, la solubilité est inférieure à 0,25 %. Cette différence est la clef de voûte du durcissement et peu d'autres alliages à base de cuivre ont un comportement comparable.

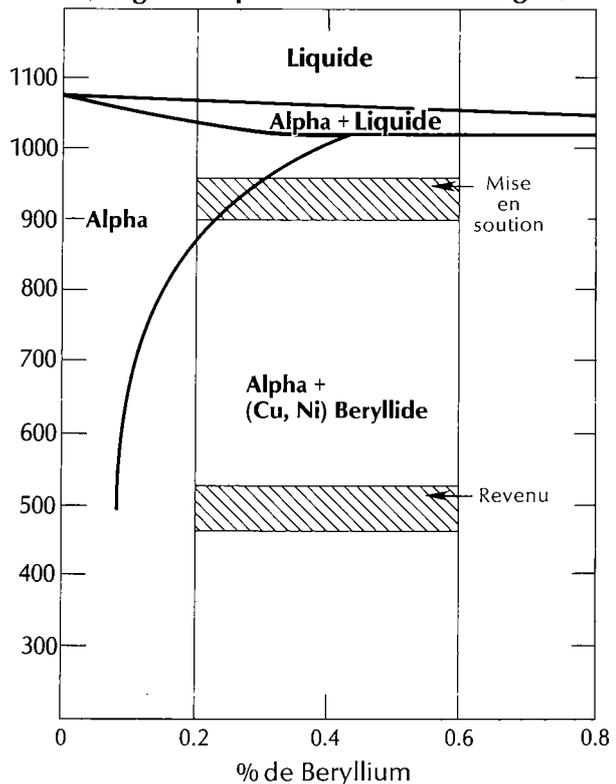
Il y a trois raisons à ajouter du cobalt aux alliages à haute résistance. Tout d'abord, et c'est le plus important, le cobalt permet d'obtenir un grain fin en limitant le grossissement du grain pendant la phase de mise en

Diagrammes d'équilibre

Alliages à haute résistance
(Diagramme binaire)



Alliage à haute conductibilité
(Diagramme pseudo-binaire de l'alliage 3)



solution. Deuxièmement, le cobalt rend la phase de revenu moins sensible à l'effet de temps de maintien, enfin il permet un léger accroissement de la dureté maximale.

Nous avons un exemple de diagramme d'équilibre pseudo binaire (composés béryllium-nickel dans le cuivre) avec celui de l'alliage 3, alliage à haute conductivité type. Ces nuances ont une teneur en béryllium comprise entre 0,15 et 0,70 %. Dans ces alliages, la majeure partie du béryllium est fractionnée en composés intermétalliques de béryllium. Les composés grossiers formés durant la solidification limitent le grossissement du grain pendant la mise en solution, tandis que les composés fins, formés pendant la phase de durcissement par précipitation, améliorent la dureté.

La mise en solution et le revenu de ces alliages s'effectuent à des températures plus élevées que pour les alliages à haute résistance. La stabilité de la phase de durcissement à température élevée permet d'obtenir une meilleure résistance, pour cette famille d'alliages, au fluage et à la relaxation sous contrainte.

Réaction au travail à froid

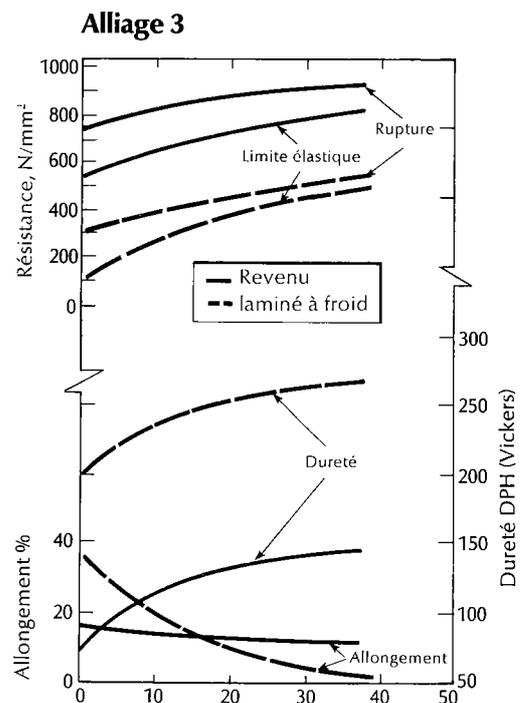
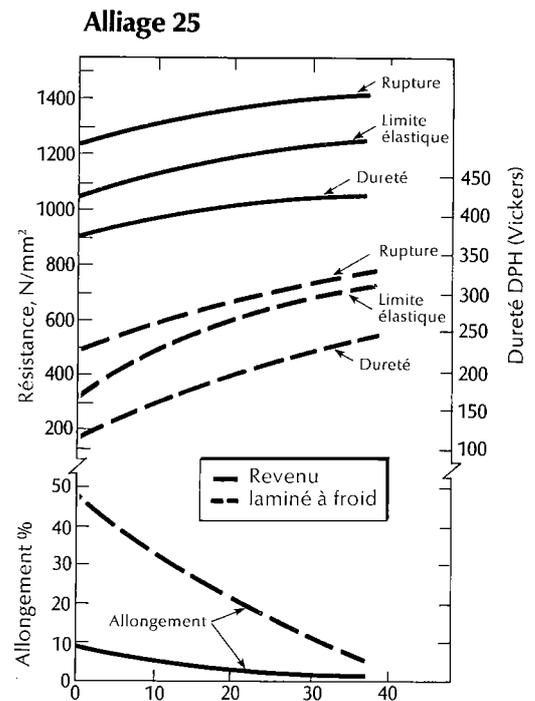
Le travail à froid dans un alliage durcissable par précipitation provoque une déformation plastique à une température inférieure au seuil de précipitation. Des opérations telles que le laminage, l'étirage, le pliage, ou l'écrasement, opérations type de travail à froid, changent les dimensions de l'échantillon, essentiellement dans deux directions. A l'inverse du travail à chaud, le travail à froid allonge les grains dans le sens de la déformation et les effets de la déformation s'additionnent.

Le travail à froid augmente la résistance et la dureté du cuivre au béryllium, comme on peut le voir sur les courbes. A cette augmentation de dureté et de résistance correspond une diminution progressive de la ductilité représentée par l'allongement à rupture.

Les effets du travail à froid (écrouissage) sont particulièrement significatifs dans le cas des produits revenus. L'écrouissage augmente le nombre de sites de précipitations et, partant, accélère le durcissement. Cependant la diminution de l'allongement en fonction de l'écrouissage est beaucoup moins rapide que pour les produits non revenus.

Lors de la fabrication des semi-produits, le travail à froid permet d'obtenir des tolérances et des profils précis. La mise en solution d'un produit travaillé à froid dans des conditions strictement contrôlées permet un affinage du grain et réduit les caractéristiques directionnelles. La combinaison judicieuse des cycles d'écrouissage et recuit (trempe) en cours de fabrication, permet l'obtention de dimensions précises et d'une microstructure bien contrôlée.

Influence de la réduction de section par laminage à froid sur les caractéristiques mécaniques des alliages 25 et 3



Revenu

La réponse au revenu dépend du temps, de la température et du taux de travail à froid, l'obtention de la résistance étant fonction des dimensions et de la distribution des précipités. Pour chaque nuance, il existe une combinaison température-temps considérée comme standard car elle permet d'obtenir la résistance maximale. En partant de ces données standard, on peut utiliser, par exemple, les températures maximales ou minimales pour répondre à des exigences se situant en-dessous de la résistance ou de la dureté maximale. Une température plus élevée engendrera une précipitation plus rapide et donc un durcissement accéléré, tandis qu'une température plus basse provoquera un durcissement plus lent.

L'interruption du revenu avant le temps nécessaire à l'obtention de la résistance maximale est appelé "sous revenu". La ténacité, la résistance à la fatigue et, dans certains cas, la résistance à la corrosion s'en trouvent améliorées.

Le "sur-revenu" est la conséquence d'un chauffage sur une période plus longue que celle nécessaire à l'obtention de la résistance maximale. Cette opération provoque la formation de précipités plus grossiers et donc, entraîne une moindre résistance et une moindre dureté. En revanche, on améliore les conductibilités électriques et thermiques, ainsi que la stabilité dimensionnelle. Il faut cependant éviter un sur-revenu trop poussé.

Le revenu ne nécessite normalement ni refroidissement contrôlé, ni atmosphère spéciale. Une atmosphère protectrice est cependant utile, spécialement lorsqu'elle est recyclée, pour réduire les gradients thermiques. Une atmosphère à bas point de rosée à 5 % d'hydrogène dans l'azote est un exemple de ce qui permet d'améliorer un transfert économique de chaleur tout en minimisant les exigences de décapage après revenu. Le revenu sous vide est difficile à réaliser à cause de la nature non uniforme du chauffage par rayonnement. Le revenu augmente légèrement la masse volumique des alliages à haute résistance à cause de la réaction de précipitation.

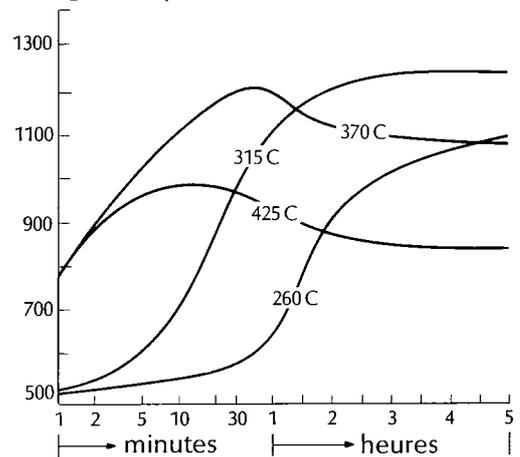
Par ailleurs le revenu s'accompagne d'une contraction volumique d'environ 0,2 %. Les changements dimensionnels des alliages à haute conductibilité sont négligeables pour la plupart des applications. On peut utiliser des conformateurs pour le revenu afin d'éviter des distorsions. Les bains de sels permettent un contrôle précis pour les revenus courts à haute température et on obtient alors des distorsions minimales et les économies d'un cycle court.

Les tensions résiduelles qui peuvent subsister, à la suite de certaines déformations, après le revenu, peuvent être supprimées sans perte de dureté. Un chauffage dans une zone de température comprise entre 150 et 200 °C pendant deux heures, est en général suffisant pour atténuer au moins en partie les tensions résiduelles.

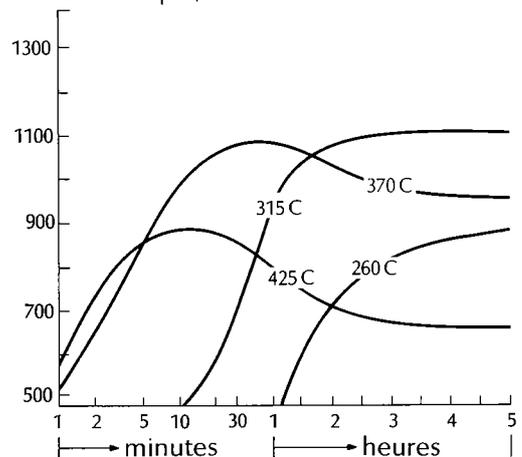
Réponse au revenu

Alliage 25 A

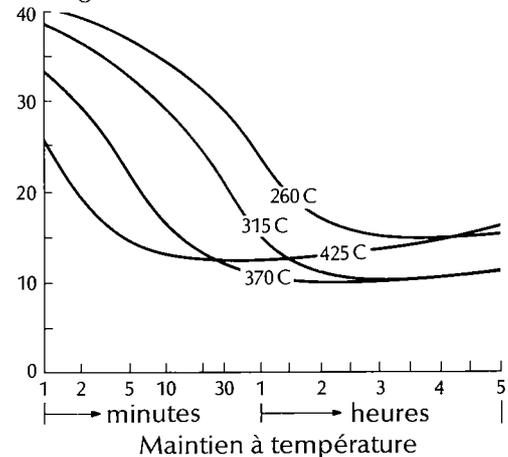
Charge de rupture N/mm^2



Limite élastique, N/mm^2



Allongement %

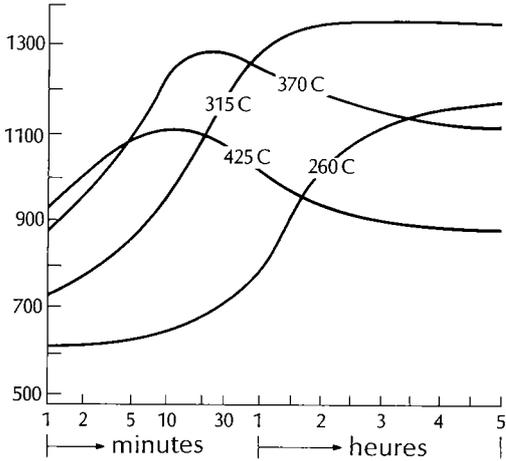


Maintien à température

Réponse au revenu
Alliage 25 état 1/2 H et H

Alliage 25 1/2 H

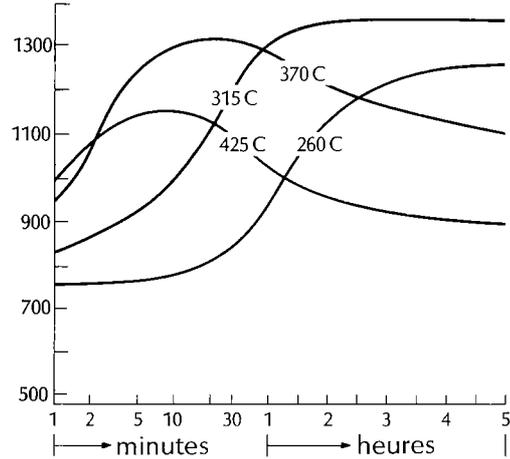
Charge de rupture N/mm^2



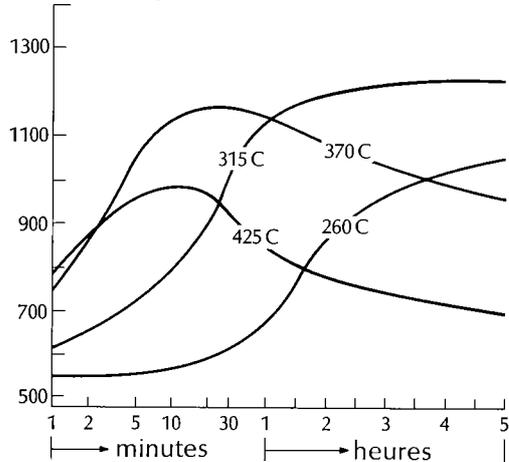
Réponse au revenu - N/mm^2

Alliage 25 H

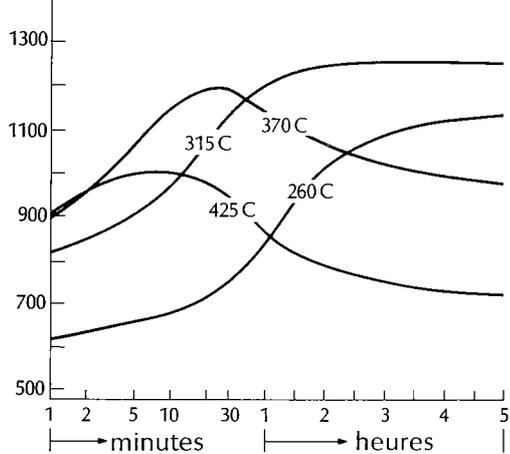
Charge de rupture, N/mm^2



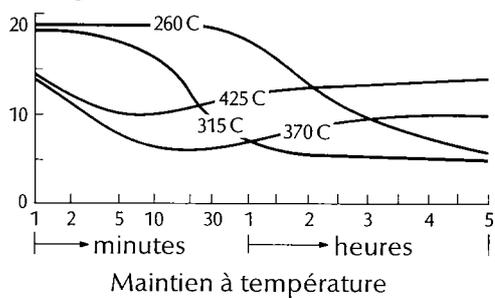
Limite élastique, N/mm^2



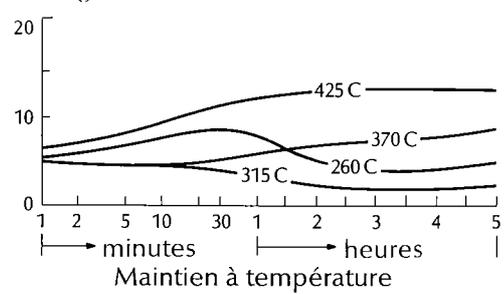
Limite élastique N/mm^2



Allongement %



Allongement %



Maintien à température

Maintien à température

Alliages à haute résistance

Le revenu standard pour l'alliage 25 est de 315 °C pendant deux à trois heures ; deux heures pour les états écrouis et trois heures pour l'état mis en solution (trempé). Les résultats obtenus à des températures de 260, 315, 370 et 425 °C figurent sur les courbes pages 25 et 26, pour les états trempé, demi-dur (1/2 écroui), et 4/4 dur (écroui).

Trois points méritent d'être soulignés à ce propos :

1) Le revenu à 315-320 °C permet d'obtenir la résistance maximale quel que soit l'état d'écrouissage de départ. La température la plus élevée permet d'obtenir la plus haute résistance dans le temps le plus court, mais la résistance maximale est diminuée. Un chauffage à basse température augmente la résistance à un rythme plus lent mais, bien qu'une valeur élevée puisse être obtenue, le processus est très long.

2) Le travail à froid améliore les niveaux de résistance quelle que soit la température de revenu. Quand le taux de travail à froid augmente, le temps de maintien à température pour obtenir la résistance maximale diminue.

3) La ductilité décroît quand la résistance augmente. Il faut noter aussi que le sur-revenu améliore la ductilité mais au détriment de la résistance.

Pour certaines applications ne nécessitant pas les propriétés maximales, on peut effectuer un cycle court à haute température. Par exemple, un chauffage à 370 °C permet d'obtenir la résistance maximale en 30 minutes. Les paramètres temps/température, en particulier le rythme de chauffage et de refroidissement, influent profondément sur l'intensité du durcissement. En conséquence, lorsque l'on utilise une méthode de durcissement particulière, la combinaison temps/température devra être déterminée par essais sur des échantillons avant de lancer la production.

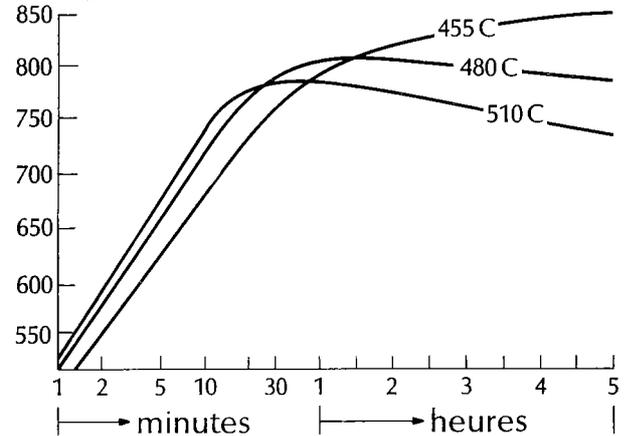
Alliages à haute conductibilité

Les courbes-types de revenu de ces alliages à l'état mis en solution figurent page 27. Bien que les températures soient différentes de celles de l'alliage 25, les mêmes principes demeurent. Un revenu à 455 °C permet d'obtenir la résistance la plus élevée mais on recommande généralement, pour ces alliages, une température de 480 °C pour obtenir la meilleure conductibilité électrique.

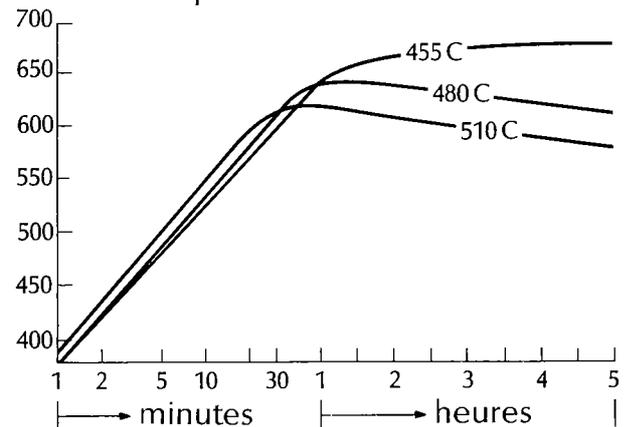
L'augmentation de la température de revenu réduit le temps nécessaire pour atteindre la résistance maximale mais les valeurs obtenues sont moindres. Lorsque le temps augmente, l'allongement décroît, tandis que la résistance augmente notablement. Au-delà de deux heures, le taux de changement de la ductilité devient négligeable.

Réponse au revenu Alliages 3 et 10 A

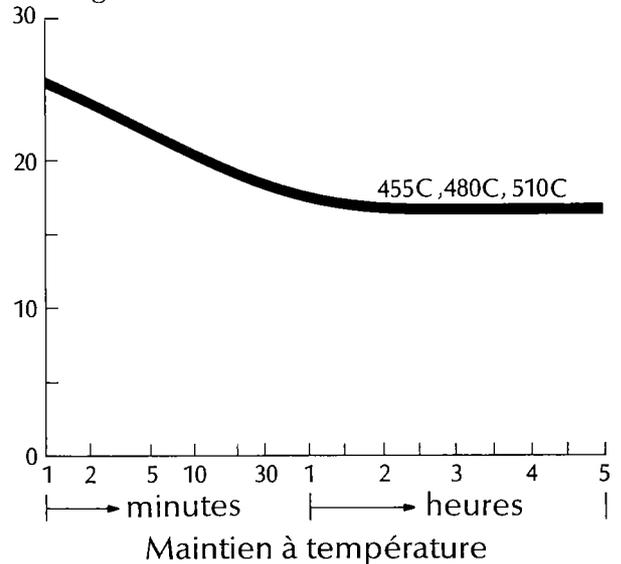
Charge de rupture, N/mm²



Limite élastique N/mm²



Allongement %

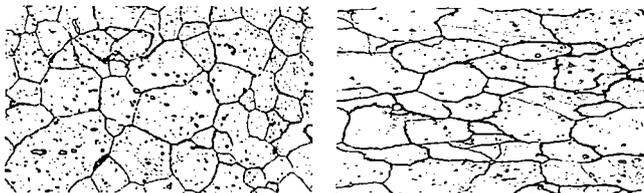


Quelques microstructures

Les effets combinés de la composition, du travail à froid et du traitement thermique, sont illustrés par les microstructures du cuivre au béryllium.

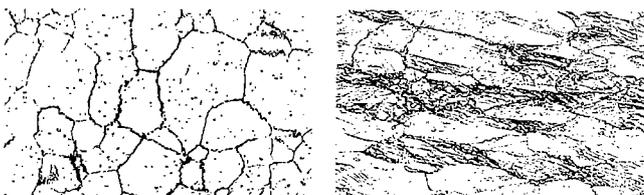
Les principales caractéristiques apparaissent sur un échantillon préparé par attaque chimique au persulfate hydroxyde d'ammonium et au bichromate de potassium. Le premier agent révèle les joints de grains dans tous les états et montre les effets du travail à froid sur le métal revenu. Le second agent met en évidence, sur un échantillon poli, les composés de béryllium. L'examen métallographique peut ainsi être adapté aux conditions d'élaboration du métal.

Alliage 25 état trempé (A) et écroui (H). 400X



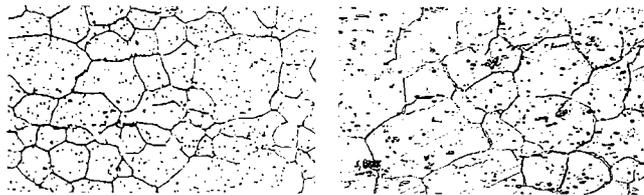
La microstructure de l'état trempé révèle une structure équi-axe avec des composés cobalt-béryllium uniformément dispersés. Celle du métal écroui montre les effets d'une réduction d'épaisseur par laminage à froid de 37 % sur la structure de départ. Le laminage allonge la structure des grains dans le sens du laminage.

Alliage 25 trempé revenu (AT) et écroui revenu (HT). 400X



L'alliage 25 à l'état AT montre quelques précipités aux joints des grains à l'état revenu maximum. L'écrouissage ajouté au revenu engendre la plus grande dureté et la résistance maximale. La microstructure de l'état HT montre l'effet du revenu sur l'alliage 25 écroui. Le revenu normal ne change pas la grosseur de grain par rapport à un métal trempé et la précipitation de phase gamma n'est pas visible à ce taux de grossissement.

Alliage 3 trempé (A) et trempé revenu (AT). 400X



Les alliages à haute conductibilité se caractérisent dans les états trempés (A) et trempés revenus (AT) par une structure de grains équi-axe avec une dispersion de composés de béryllium riches en nickel ou en cobalt. Les caractéristiques, dans le cas présent celles de l'alliage 3, sont plus difficiles à faire apparaître par attaque chimique.

Alliage 25 trempé revenu. (Grossissement 110 000)



Une image prise au microscope électronique de l'alliage 25 montre des zones de tension associées à des précipités. Ces précipités sont responsables du durcissement. Ils forment tout d'abord ce qu'on appelle des zones de Guinier-Preston, et passent ensuite par différentes phases où la structure tétragonale s'affirme avant de se transformer en zones d'équilibre gamma.

Décapage et finition

Les cupro-béryllium offrent toutes les possibilités de soudure et de revêtement que l'on connaît bien pour les alliages cuivreux. Cependant, comme ils sont souvent utilisés pour des applications de précision, la propreté des surfaces doit être considérée comme un élément critique lorsque les pièces doivent être revêtues ou assemblées par soudure tendre, brasage ou soudure. Toutes les substances étrangères telles que l'huile, la graisse, la peinture, la poussière, la saleté, la ternissure, ou l'oxyde doivent être éliminées avant ces opérations. On n'insistera jamais assez sur ce point car bien des problèmes mettant en cause le revêtement ou la soudure proviennent en définitive d'un décapage inadéquat ou mal conduit.

Décapage

La première étape de la préparation du cupro-béryllium pour les opérations de revêtement et de soudure est l'élimination de toutes les souillures, en particulier les huiles et les graisses. Elles sont normalement présentes en tant que résidus des lubrifiants utilisés pendant les opérations de mise en forme ou à la suite d'exposition à des atmosphères chargées de microparticules d'huile telles qu'on en trouve dans les ateliers. Les lubrifiants contenant du soufre, si on ne les élimine pas rapidement, peuvent pour leur part, tacher les alliages cuivre-béryllium. Les souillures résultant des opérations de manutention, avec les traces de doigts ou les marques laissées par des gants gras sont notoirement nocives.

Les nettoyants conventionnels tels que les solvants organiques et les solutions alcalines sont normalement suffisants pour enlever les résidus huileux. On doit prendre garde à ce que les concentrations de solutions, les températures, et les débits soient maintenus dans des limites convenables et à ce que soient maintenus des systèmes de pompage ou de filtration appropriés. Le dégraissage à la vapeur est particulièrement indiqué pour enlever les huiles et les graisses. Le phosphate trisodique et les solutions alcalines similaires, y compris de nombreuses formules "maison" donnent également satisfaction, tandis que le décapage ultrasonique ou électrolytique peut encore s'ajouter à ces moyens pour obtenir les meilleurs résultats.

Toutes les solutions de décapage devront soigneusement être éliminées de toutes les surfaces. Tous les problèmes pouvant se poser, lors de l'essai d'un décapant, devront être résolus par des essais sur échantillon.

Comme tous les alliages de cuivre, la surface des cuivres au béryllium peut se couvrir d'une fine pellicule d'oxyde, une ternissure, lorsqu'elle reste exposée à l'air. La formation de cette pellicule terne

est accélérée par la chaleur et la présence d'humidité. L'oxydation est le résultat normal du traitement thermique et même si l'on utilise une atmosphère protectrice, il faut s'attendre à la formation d'oxydes qui seront préjudiciables lors des opérations de soudure et de revêtement. A noter que les feuillards revenus sont soigneusement décapés et neutralisés avant livraison.

Les oxydes de surface se présentent sous deux formes : l'oxyde de béryllium présent sur les surfaces exposées aux hautes températures requises lors de la mise en solution, et les combinaisons d'oxyde de béryllium et de cuivre qui apparaissent sur les pièces après le revenu. Nous ne parlerons pas ici de l'élimination d'un film continu d'oxyde de béryllium étant donné que l'opération de mise en solution est rarement effectuée par l'utilisateur. Dans certains cas spéciaux, par exemple pour enlever des oxydes formés pendant une opération de soudure ou de mise en solution, il conviendra de contacter le fabricant qui indiquera les procédures de décapage appropriées.

On peut préparer la surface des alliages cuivre-béryllium pour les revêtir ou les souder, ou simplement pour leur restituer leur apparence brillante originale avec le processus suivant :

1 – Immerger les pièces dans une solution aqueuse à 50/55 °C et à 20 ou 25 % en volume d'acide sulfurique à laquelle on ajoute 2 à 3 % en volume d'eau oxygénée. Le temps d'immersion sera le temps nécessaire à la disparition de la coloration foncée et à l'obtention de l'état de surface désiré.

2 – Rincer soigneusement et sécher.

Lorsque c'est nécessaire, les pièces fabriquées dans du métal revenu en usine peuvent être décapées par le processus décrit ci-dessus. Dans tous les cas, il faudra veiller à ne pas immerger les pièces trop longtemps et éviter les concentrations excessives d'acide, ce qui pourrait provoquer un enlèvement de métal et une diminution mesurable des dimensions.

Galvanoplastie

Le cuivre, le chrome, l'or, l'argent, le nickel, l'étain et d'autres métaux sont couramment déposés sur les alliages cuivre-béryllium. BRUSH WELLMAN livre des bandes plaquées.

On peut utiliser les traitements de préparation suivants :

Alliages autres que le M25 :

1 – Nettoyage cathodique avec une solution alcaline chaude.

2 – Rinçage à l'eau froide.

3 – Immersion 10 à 15 secondes dans une solution à 50-55 °C et à 20-25 % en volume d'acide sulfurique à laquelle on ajoutera 2 à 3 % en volume d'eau oxygénée.

4 – Rinçage à l'eau froide.

Alliage M25 :

1 – Nettoyage cathodique avec une solution alcaline chaude.

2 – Rinçage à l'eau froide.

3 – Immersion 10 à 15 secondes dans une solution aqueuse à température ambiante contenant 10 à 12 % en volume d'acide fluoborique.

4 – On peut enfin, mais cela est facultatif, appliquer un cyanure de cuivre pour favoriser l'adhésion comme cela est recommandé pour la plupart des

alliages de cuivre.

Les alliages cuivre-béryllium peuvent se colorer par toutes sortes de techniques conventionnelles utilisées pour les alliages cuivreux.

Le brossage humide, le bufflage, et le polissage électrolytique sont des procédés utilisés pour obtenir des finitions de surface extrêmement poussées. Le meilleur polissage électrolytique est obtenu avec un électrolyte acide nitrique/méthanol à - 57 °C. Un électrolyte acide phosphorique/chromate peut être utilisé à l'ambiante mais avec le risque de laisser apparaître des particules intermétalliques en relief. On peut mélanger de l'acide phosphorique, de l'acide nitrique, et de l'acide acétique pour obtenir une solution de polissage chimique utilisable à 70 °C.

Assemblage

Le soudage et le brasage sont des techniques d'assemblage courantes pour les cupro-béryllium. Comme pour tous les alliages durcissables par précipitation, le temps de chauffage et la température doivent être contrôlés pendant l'opération d'assemblage.

Le soudage du cuivre au béryllium présente des avantages par rapport à certains alliages pour lesquels la résistance dépend de l'écrouissage. Pour les cuivres au béryllium, la zone de soudage garde jusqu'à 90 % ou plus des propriétés mécaniques du métal de base. La sensibilisation et les autres difficultés que l'on rencontre en soudant d'autres alliages ne sont pas un problème avec les cupro-béryllium.

Le soudage tendre

On le recommande normalement lorsque la température prévisionnelle d'utilisation est inférieure à 150 °C et qu'il est difficile d'assurer la continuité thermique et électrique avec un système d'assemblage mécanique. Cette opération peut se faire en automatique et peut être réalisée par un chauffage par résistance, induction, infrarouge ou flamme.

Les techniques d'application incluent immersion, phase vapeur, ou autre. On peut effectuer le soudage tendre du cuivre au béryllium après un revenu, sans porter préjudice aux caractéristiques mécaniques. La plupart des flux standards peuvent être utilisés mais sans que ces flux se substituent à un décapage approprié.

Les fondants activés à la colophane (grades RMA ou RA) sont recommandés mais ils devront être éliminés par un rinçage à l'eau chaude après soudage pour prévenir toute corrosion.

Il faut normalement assembler les pièces aussitôt après avoir préparé la surface. Si on ne peut procéder ainsi, il faudra entreposer les pièces dans un local propre, protégé des vapeurs acides sulfureuses ou ammoniacales.

La durée de conservation de la zone d'assemblage peut être prolongée en passivant la surface avec du benzotriazole (BTA) ou par recouvrement avec de l'étain pur ou un mélange étain-plomb.

On peut utiliser toutes les soudures classiques pour souder le cupro-béryllium. L'alliage 60/40 contenant 60 % d'étain et 40 % de plomb est généralement recommandé pour les applications électroniques, en particulier si on utilise des processus à grande vitesse. Le soudage manuel permet une certaine latitude dans l'emploi des soudures et l'alliage 50/50 plomb-étain peut, parmi d'autres, être utilisé.

Brasage

Comparé au soudage tendre, le brasage permet d'obtenir une plus grande résistance et une meilleure tenue aux températures moyennes. Étant donné que l'opération s'effectue à une température relativement élevée, il est préférable de braser avant revenu. On

peut aussi braser un métal revenu à condition d'utiliser un cycle rapide. On utilisera les temps et températures les plus réduits permettant d'assurer la pénétration de la brasure. La propreté de la surface est un élément essentiel d'un bon brasage. La surface devra être nettoyée et exempte de toute trace de saleté et d'huile. On utilisera une solution aqueuse à 10 ou 20 % d'acide nitrique et l'on rincera soigneusement. Le brasage peut oxyder légèrement les surfaces. Il faudra alors, pour enlever l'oxyde, immerger les pièces dans une solution à 50 % d'hydroxyde de sodium à 130 °C suivi d'un décapage acide normal. Le brasage au four par induction ou à la torche, sont des procédés courants. La réussite dépend de facteurs tels que le type d'assemblage et la dimension de la pièce, et de paramètres thermiques tels que la quantité de chaleur reçue et sa vitesse de dissipation. On peut utiliser des systèmes de refroidissement pour limiter l'échauffement dans la zone d'assemblage. Le cycle de brasage devra être court pour éviter le sur-revenu. Les grosses pièces brasées au four devront être trempées à l'eau afin de permettre un revenu ultérieur. Dans tous les cas, les températures de brasage ne

devront pas dépasser les températures de mise en solution soit 790 °C pour les alliages à haute résistance et 870 °C pour les alliages à haute conductibilité.

Soudage

C'est un procédé couramment utilisé, mais il faut prendre des précautions. On portera une attention particulière au type d'assemblage, au préchauffage (à une température inférieure à la température de revenu), à la technique de soudage. Les cupro-béryllium se soudent facilement par résistance, soit par point, soit avec un cordon de soudure, avec eux-mêmes ou d'autres métaux. On utilise aussi le laser ou les ultrasons. On peut utiliser les procédés TIG (Tungsten arc Inert Gas), MIG (Metal arc Inert Gas), l'arc-plasma et le bombardement électronique. Le revenu pourra s'effectuer après l'opération si l'on ne cherche pas à obtenir les caractéristiques maximales dans la zone de soudage, et si la soudure est située dans une zone de moindre contrainte.

Usinage

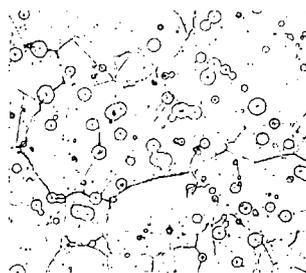
L'usinage par enlèvement de métal peut être réalisé sur les cupro-béryllium avec des vitesses équivalentes ou supérieures aux valeurs publiées pour les alliages cuivreux et les aciers inoxydables de décolletage. Ceci ne se fait pas au détriment de la durée de vie de l'outil pourvu qu'on utilise des outils et des lubrifiants appropriés.

Le tableau page 32 donne quelques indications sur les vitesses et profondeurs de coupe. Les taux d'enlèvement élevés posent quelquefois des problèmes d'enlèvement de copeaux pour les produits trempés ou écrouis. En effet, les copeaux longs, minces et résistants sont parfois difficiles à éliminer. Pour éviter cet écueil, les cupro-béryllium sont généralement usinés à l'état revenu. En plus, cela permet l'élimination des opérations de revenu et de décapage après usinage.

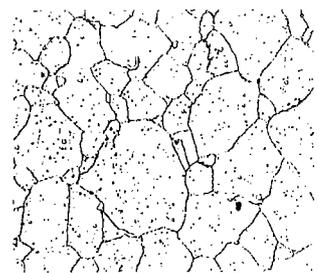
L'alliage M25, dans n'importe quel état, permet, en revanche, un meilleur contrôle du copeau grâce à une addition soigneusement contrôlée de plomb. Cet alliage est bien adapté aux opérations d'usinage sur tours automatiques car le plomb réduit l'usure des outils et élimine le bourrage des copeaux.

On peut voir ici deux microstructures, l'une d'alliage 25 trempé et revenu, l'autre l'alliage M25, dans

Alliage M 25 AT (400 x)



Alliage 24 AT (400 x)



le même état (grossissement 400). La présence du plomb dans l'alliage M25 est mise en évidence par une préparation métallographique particulière. Le plomb, qui est réparti uniformément, apparaît sous forme de fines particules visibles à l'intérieur des cercles, grâce à un procédé spécial d'attaque chimique. Bien que la présence du plomb limite les opérations de travail à chaud, elle n'affecte en aucune manière la réponse au revenu qui est identique à celle de l'alliage 25.

Comme pour de nombreux alliages à hautes performances, l'usinage peut durcir la surface du cupro-béryllium. Une profondeur de passe trop faible ou un outil usé peuvent accentuer ce durcissement. Pour obtenir les meilleurs résultats, il faut s'assurer que les outils sont

Vitesses et avances recommandées pour l'usinage des cupro-béryllium

Type d'usinage	Vitesse de coupe mètre/minute	Avance mm/tour	Profondeur de passe en mm	Nature de l'Outil
Alliages 25, M25 et 165				
Tournage				
Trempé	455	0,13-0,25	0,65-1,30	C2
Étiré Écrouï	365	0,13-0,25	0,65-1,30	C2
Métal traité	275	0,13-0,25	0,65-1,30	C2
Perçage				
Trempé	60-105	0,05-0,23	—	Acier rapide
Étiré Écrouï	45-75	0,05-0,23	—	Acier rapide
Métal traité	30-90	0,05-0,23	—	Acier rapide
Taroudage				
Trempé	15-30	—	—	Acier rapide
Étiré Écrouï	10-15	—	—	Acier rapide
Métal traité	3-7	—	—	Acier rapide
Alliages 3 et 10				
Tournage	240-300	0,25-0,63	1,30-3,20	C2
Perçage	40-180	0,05-0,13	—	Acier rapide
Taroudage	4-45	—	—	Acier rapide

bien affûtés, que l'avance est suffisante, et que chaque passe pénètre bien en-dessous de la couche écrouïe par la passe précédente.

Les outils de coupe devront être bien affûtés avec un angle de coupe positif compris entre 5 et 20 degrés et il sera judicieux d'utiliser un brise-copeaux.

On recommande, pour améliorer l'état de surface et la vie des outils, d'utiliser des huiles de coupe comme agents de refroidissement. Il s'agit habituellement d'émulsions synthétiques et d'huiles solubles dans l'eau. Les meilleurs états de surface seront obtenus avec des huiles sulfurisées, mais ces huiles ternissent les cupro-béryllium (comme d'ailleurs les autres alliages de cuivre). Les taches ne sont pas nocives mais elles devront être enlevées après

usinage, surtout si les pièces doivent ensuite subir un revenu.

On usine aussi les alliages cuivre-béryllium par d'autres procédés conventionnels tels que le meulage ou l'abrasion. Il faut suivre les conseils donnés par les fabricants de meules pour déterminer le type de meule, la vitesse, le taux d'enlèvement de métal, et les agents de refroidissement. Le meulage ne devra jamais s'effectuer à sec.

Enfin, les cupro-béryllium peuvent être aussi usinés par des méthodes non conventionnelles, telles que l'usinage photochimique des feuillards avec utilisation de masques, l'usinage par électro-érosion, soit par enfonçage, soit par fil ou enfin, l'usinage électro-chimique.

Dureté

Bien que la mesure des caractéristiques mécaniques doive se faire par une éprouvette de traction, la dureté donne des approximations utiles. Il s'agit essentiellement d'un test non destructif adapté aux pièces finies, et l'équipement est mobile. C'est

ainsi qu'on peut mesurer assez facilement la dureté d'un contact miniature, d'une électrode de soudure par résistance, ou d'un palier de train d'atterrissage.

Chaque test de dureté trouve ses limites en fonction de l'épaisseur du produit. La méthode de mesure

doit donc tenir compte de cette dimension. Le tableau indique les épaisseurs minimales appropriées en fonction des différentes méthodes de mesure.

Attention cependant ! Les valeurs de dureté mesurées selon une méthode donnée, ne correspondent pas toujours aux valeurs mesurées par une méthode différente. On devra donc éviter les conversions.

Prenons un exemple !

Si une dureté de 37 Rockwell C minimum est exigée, il faudra éviter de procéder à une mesure utilisant l'échelle 15N ou 30N et ensuite convertir en Rockwell C. Il faudra, au contraire, effectuer directement la mesure en Rockwell C. La conversion pourra à la rigueur être effectuée pour des applications moins critiques telles que la mesure de dureté d'un demi produit.

La pointe de diamant (ou Vickers) a l'avantage de couvrir toute la gamme de dureté des produits métal-

Épaisseurs minimales suivant les méthodes de mesure de dureté

Échelles Rockwell		Vickers	Brinell
B et C	1,00 mm	0,050 mm	3,20 mm
30T et 30N	0,50 mm		
15T et 15N	0,38 mm		

liques et on peut, dans ce cas, comparer directement les duretés de produits de dimensions différentes.

Les techniques de mesures par micro-duretés sont largement utilisées pour les feuillards fins, les fils, et d'une manière générale pour les produits de petites dimensions.

Table de conversion des duretés

Rockwell			Pyramide Diamant ou Vickers	Brinell	Rockwell			Pyramide Diamant ou Vickers	Brinell
C	15N	30N		3000 kg	B	15T	30T		500 kg
48	84.5	66.5	485	460	100	93.0	82.0	240	201
47	84.0	66.0	471	448	99	92.5	81.5	234	195
46	83.5	65.0	458	437	98	—	81.0	228	189
45	83.0	64.0	445	426	97	92.0	80.5	222	184
44	82.5	63.0	435	415	96	—	80.0	216	179
43	82.0	62.0	424	404	95	91.5	79.0	210	175
42	81.5	61.5	413	393	94	—	78.5	205	171
41	81.0	60.5	403	382	93	91.0	78.0	200	167
40	80.5	59.5	393	372	92	90.5	77.5	195	163
39	80.0	58.5	383	362	91	—	77.0	190	160
38	79.5	57.5	373	352	90	90.0	76.0	185	157
37	79.0	56.5	363	342	89	89.5	75.5	180	154
36	78.5	56.0	353	332	88	—	75.0	176	151
35	78.0	55.0	343	322	87	89.0	74.5	172	148
34	77.0	54.0	334	313	86	88.5	74.0	169	145
33	76.5	53.0	325	305	85	—	73.5	165	142
32	76.0	52.0	317	297	84	88.0	73.0	162	140
31	75.5	51.5	309	290	83	87.5	72.0	159	137
30	75.0	50.5	301	283	82	—	71.5	156	135
29	74.5	49.5	293	276	81	87.0	71.0	153	133
28	74.0	48.5	285	270	80	86.5	70.0	150	130
27	73.5	47.5	278	265	79	—	69.5	147	128
26	72.5	47.0	271	260	78	86.0	69.0	144	126
25	72.0	46.0	264	255	77	85.5	68.0	141	124
24	71.5	45.0	257	250	76	—	67.5	139	122
23	71.0	44.0	251	245					
22	70.5	43.0	246	240					
21	70.0	42.5	241	235					
20	69.5	41.5	236	230					

Résistance à la fatigue

Les alliages cuivre-béryllium sont utilisés depuis longtemps sous forme de fils et feuillards pour fabriquer des connecteurs et des ressorts de contact devant subir des contraintes cycliques.

On les utilise aussi pour la réalisation de composants plus lourds. C'est le cas par exemple des bagues de trains d'atterrissage, de certains éléments de roulements et de certains équipements utilisés dans les techniques de forages pétroliers.

Cette résistance aux contraintes cycliques est une des caractéristiques remarquables des cupro-béryllium. Ces contraintes sont générées par des flexions unilatérales ou alternées, des contraintes axiales, ou encore des flexions rotatives.

La résistance à la fatigue se définit comme la contrainte maximale pouvant être appliquée pour un nombre défini de cycles sans rupture. Lorsque le nombre de cycles est faible, la valeur de la résistance sous contrainte alternée approche la valeur de la résistance statique. En revanche, quand le nombre de cycles va de un million à dix millions, cette valeur diminue jusqu'à devenir une fraction de celle de la résistance statique.

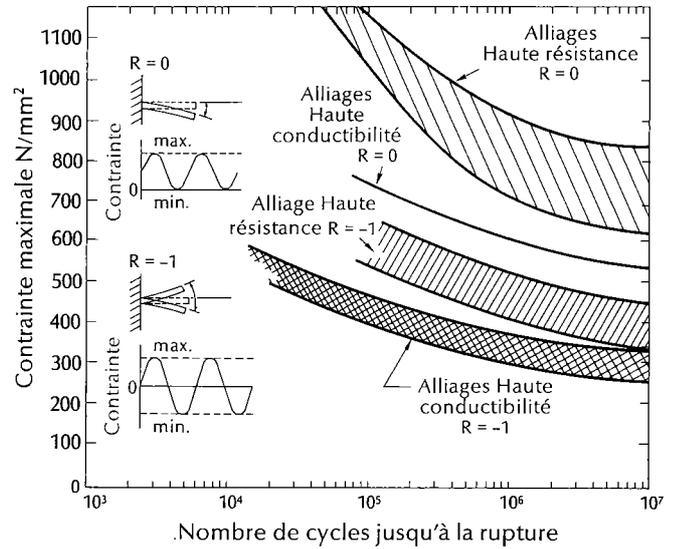
Les alliages cuivre-béryllium résistent à la rupture par fatigue grâce à leur résistance statique, à leur ténacité et leur aptitude à augmenter leur résistance par le travail à froid.

La capacité de résistance à la fatigue est illustrée par les courbes ci-contre. Le rapport contrainte minimale/contrainte maximale, ou rapport de contrainte, est défini par la lettre R. Il définit les conditions de l'essai. La résistance à la fatigue sera plus grande dans le cas d'une déflexion unidirectionnelle ($R = 0$) que dans le cas d'une flexion alternée ($R = -1$). Les essais classiques mesurent la résistance à la fatigue sur éprouvettes plates ou rondes.

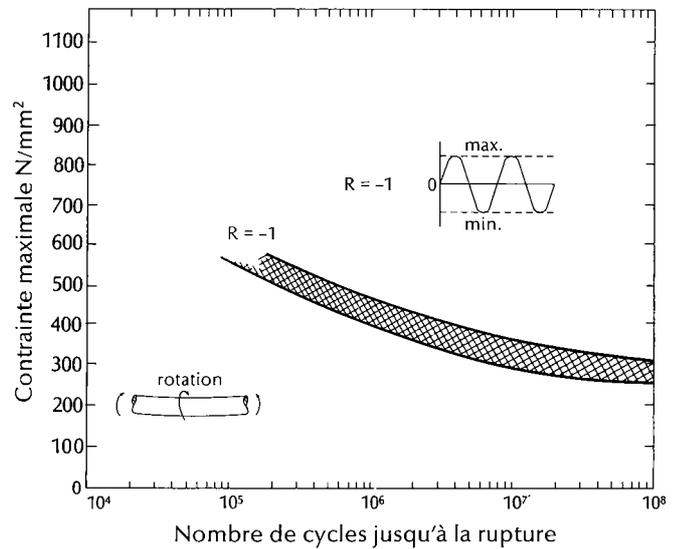
Les chiffres indiqués ici doivent être considérés comme indicatifs car les performances dépendent des qualités de surface et des conditions de service. Il faudra veiller à obtenir la meilleure surface possible, en particulier aux angles et aux rayons de filets, pour tirer le maximum d'avantages de ces alliages.

Limite de fatigue – N/mm²

Limite de fatigue en flexion



Limite de fatigue en rotation



Résistance à la corrosion

Résistance à la corrosion atmosphérique et conservation

Dans les conditions d'environnement généralement rencontrées durant la production, le stockage, et l'utilisation des appareils électriques et électroniques, la résistance à la corrosion des alliages cuivre-béryllium est supérieure à celle de la plupart des alliages de cuivre.

La résistance à la ternissure est critique car la plupart des composants électroniques sont soudés après un stockage prolongé. L'inhibition de la surface par le benzotriazole (BTA) réduit la formation d'oxyde et améliore la durée de conservation. Pour une soudabilité maximale les cupro-béryllium doivent être revêtus avant stockage.

Environnements marins

La résistance à la corrosion à l'eau douce ou salée du cupro-béryllium est bonne grâce à une vitesse de corrosion lente et à une résistance inhérente à l'action des salissures biologiques.

Des enveloppes de répéteurs de câbles sous-marins sont en service depuis plus de trente ans, sans montrer aucun signe de corrosion préjudiciable à leur usage. Le cupro-béryllium avait été choisi pour ses qualités de résistance, usinabilité et résistance à la corrosion.

Environnements industriels

La résistance à la corrosion est bonne vis-à-vis des glycols, alcools, esters, cétones, hydrocarbures et de la plupart des solvants organiques. La sensibilité du cupro-béryllium aux impuretés contenues dans ces liquides est plus grande que la sensibilité aux liquides eux-mêmes. C'est ainsi que la présence de traces de sulfure, d'acides, d'alcalis, d'eau, ou de sels peut accélérer la corrosion. Les fumées de chlorures de polyvinyl (PVC) et les silicones RTV corrodent les alliages cuivre-béryllium et d'autres alliages cuivreux. Les émanations d'autres matières plastiques, telles que le nylon, l'acétal ou le polytétrafluoréthylène (PTFE) n'affectent pas les alliages cuivreux.

La résistance à la corrosion est satisfaisante dans les solutions aqueuses de la plupart des hydroxydes alcalins, chaudes ou froides. En revanche, le cuivre au béryllium ne résiste pas aux solutions ammoniacales qui provoquent une corrosion fissurante. De même, le cuivre au béryllium ne devra pas être en contact avec le gaz ammoniac, sauf si celui-ci est sec et totalement dépourvu d'oxygène.

Ces alliages résistent à la corrosion de l'acide sulfu-

rique concentré froid, de l'acide sulfurique dilué froid ou chaud ou de l'acide chlorhydrique dilué à froid. Cependant, comme pour d'autres alliages de cuivre, les expositions aux acides oxydants concentrés, tels que l'acide nitrique, sont déconseillées. Les acides, tels que l'acide chlorhydrique et l'acide sulfurique deviennent corrosifs lorsqu'ils contiennent des impuretés oxydantes.

Le cuivre au béryllium n'est pas sensible à la corrosion fissurante causée par les ions chlorure, à l'inverse des aciers inoxydables. Ceci en fait un matériau idéal pour des applications en milieu de forages pétroliers.

Les alliages cuivre-béryllium résistent à la fragilisation par l'hydrogène mais sont susceptibles de ruptures différées dues à une fragilisation par contact avec un métal liquide tel que le mercure. Le durcissement par écrouissage ou par traitement thermique augmente cette susceptibilité.

Comportement des cupro-béryllium suivant l'environnement :

- **Industriel** : durée de conservation pour opérations de soudure jusqu'à 18 mois.
- **Urbain** : résistance à la sulfuration cinq fois supérieure à celle du cuivre.
- **Eau de mer statique** : moins de 0,05 mm par an.
- **Biosalissures** : bon comportement prouvé après trente années d'exposition.
- **Chlorures saturés** : Insensible à la corrosion fissurante dans les chlorures de sodium, de potassium, de magnésium, et les sels mixtes.
- **Hydrogène** : pas d'effet sur la ductilité après recharge cathodique pendant plus de 100 heures à 32 °C (90°F).
- **Organiques** : compatibilité avec la plupart des solvants bien que des impuretés puissent provoquer des corrosions.
- **Fumées organiques** : résistance à évaluer cas par cas.
- **Acides dilués et alcalis** : à utiliser avec précaution.
- **Acides oxydants concentrés** : utilisation déconseillée.
- **Gaz ammoniac** : résistants aux attaques par le gaz ammoniac anhydre, la présence d'humidité provoque la fissuration par corrosion sous tension.
- **Mercure et autres métaux liquides** : à éviter.
- **Divers** : attaqués par les chlorures et sulfures ferriques les solutions ammoniacales et les composés du mercure.

Autres propriétés

Les alliages cuivre-béryllium sont utilisés dans les connecteurs pour leurs propriétés élastiques et leur formabilité, pour fabriquer des commutateurs où l'on recherche leur résistance à la fatigue et leur conductibilité électrique, ou pour la réalisation d'électrodes de soudure où l'on a besoin de leur dureté et de leur conductibilité thermique.

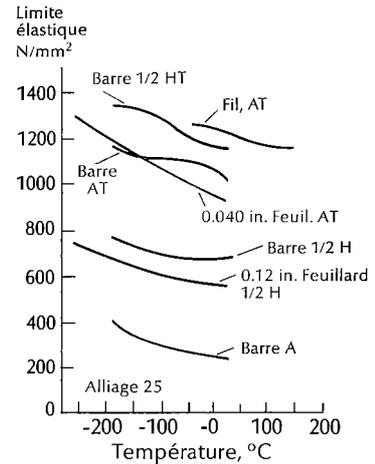
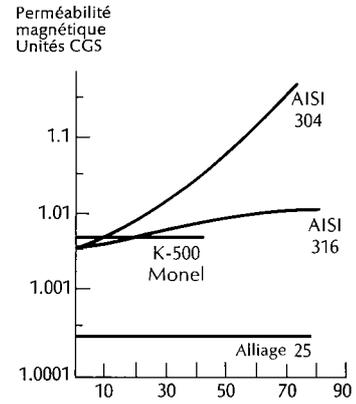
Ces alliages possèdent beaucoup d'autres caractéristiques utiles dont le concepteur pourra tenir compte. Nous en présentons quelques unes ici.

Antidéflagrants : c'est l'une des caractéristiques les plus anciennement connue de ces alliages utilisés pour la fabrication d'outillages pour des industries où le risque d'une étincelle n'est pas admissible. Au moment de l'impact, une particule chaude, riche en cuivre, refroidit rapidement et ne s'enflamme pas. De plus, la dureté du cuivre au béryllium lui assure une longévité suffisante.

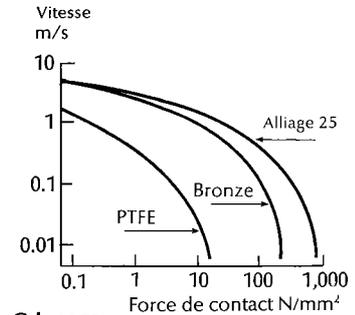
Amagnétiques : la perméabilité magnétique de l'alliage 25 soumis à un champ magnétique d'une intensité de 1000 Gauss est comprise entre 0,997 et 1,003 (une perméabilité magnétique de 1 représente la transparence pour des champs à variation lente). Cette propriété n'est pas affectée par l'érouissage, à l'inverse d'autres alliages non magnétiques qui peuvent le devenir à la suite d'opérations d'usinage ou de pliage. Combinées avec une résistance ou une ténacité à la rupture élevée, et une bonne stabilité dimensionnelle, ces propriétés permettent une utilisation par exemple comme enveloppe de protection des instruments de mesure de champs magnétiques.

Résistants au grippage : cette propriété est inhérente à ce type d'alliages et permet le contact avec d'autres alliages, avec un minimum de friction et de détérioration des surfaces. Les joints filetés en cuivre au béryllium en contact avec un cuivre au béryllium ou un acier inoxydable, ne grippent pas même en cas de surcharge. Cette excellente résistance au grippage est due à une dureté élevée, à une aptitude à l'autolubrification, à la présence d'un film de surface, et à une conductibilité thermique élevée.

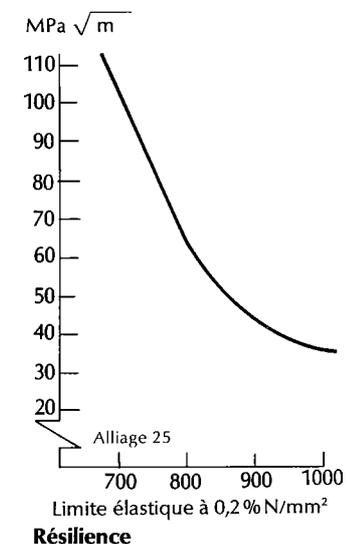
Comportement en environnement cryogénique : on utilise le cuivre au béryllium dans l'hydrogène et dans l'oxygène liquide car il garde ses propriétés de résistance et de ténacité en milieu cryogénique. Il n'y a pas, pour ces alliages, de température de transition d'une phase de ductilité à une phase de fragilité.



Propriétés cryogéniques



Grippage



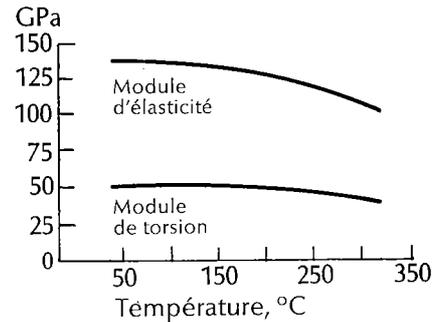
Résistance à haute température : la stabilité des caractéristiques mécaniques est bonne dans une zone comprise entre les températures cryogéniques et une température de 260 °C. Des tests effectués sous des contraintes normales ont montré que les caractéristiques mécaniques se maintiennent, pour l'essentiel, de la température ambiante à 260 °C.

Les alliages à haute conductibilité gardent leur résistance jusqu'aux environs de 300 °C. La dureté de ces alliages conduit à les utiliser pour les électrodes de soudure et les éléments de moules pour l'injection de matières plastiques.

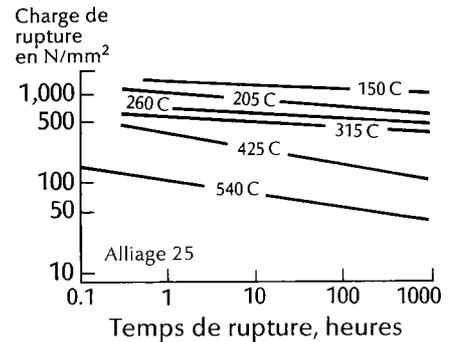
Pouvoir réfléchissant : le cuivre au béryllium peut se polir comme un miroir. Sa surface reflète efficacement la lumière grâce à sa couleur dorée, particulièrement dans le spectre des infrarouges. Le pouvoir réfléchissant de ces alliages, leur usinabilité et leur stabilité dimensionnelle, permet de les utiliser pour la réalisation de miroirs dans le cas où s'exercent par exemple des contraintes de centrifugation.

Stabilité dimensionnelle : si on utilise le revenu pour augmenter la dureté et la résistance, on s'en sert aussi pour diminuer les contraintes dans le métal. Ceci permet de maintenir une excellente stabilité dimensionnelle durant les opérations d'usinage ou de découpe.

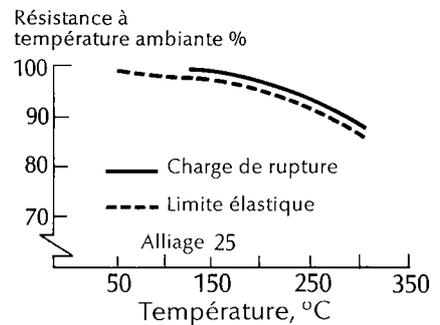
Traitements de surface spéciaux : la modification des états de surface des alliages cuivre-béryllium permet d'obtenir des caractéristiques particulières. Ainsi, un oxyde formé à haute température permet d'augmenter sensiblement les émissions d'électrons secondaires. On utilise aussi diverses techniques pour obtenir un durcissement dans une zone limitée. Le laser et les techniques de bombardement électronique permettent d'obtenir des états de surface allant de la mise en solution localisée au glaçage. On utilise également des revêtements pour obtenir un meilleur pouvoir d'émission ou une plus grande dureté.



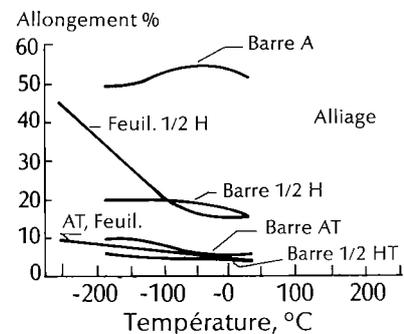
Propriétés à hautes températures



Fluage



Propriétés à hautes températures



Propriétés cryogéniques

Qui est Brush Wellman ?

Brush Wellman est la firme productrice des alliages décrits tout au long de cette plaquette. Voici quelques informations sur cette compagnie.

Historique de la société

La Brush Béryllium Company fut fondée en 1931 pour commercialiser la technologie du béryllium des Laboratoires Brush développée à partir de 1921 par Charles Brush Jr et le Docteur Baldwin Sawyer.

Ce travail de pionner était axé sur l'extraction du minerai et la production de métal, d'oxyde et d'alliage-mère.

A la fin des années 40, la Commission de l'Énergie Atomique Américaine (A.E.C.) commença à s'intéresser à la technologie de la fabrication du béryllium métal en poudre, et devint le premier client important pour le métal et l'oxyde de béryllium.

Les applications commerciales commencèrent à prendre de l'importance dans les années 50 et en 1953, Brush construisit une petite usine de production d'alliage-mère à Elmore (Ohio). Cette usine est actuellement la plus moderne et la plus importante du monde.

En 1958 ce fut l'achat de la Penn Precision Product Company de Reading en Pensylvanie, ce qui permit à la compagnie de démarrer la production d'une gamme complète de produits laminés en alliages cuivre-béryllium.

Dans les années 60 Brush acquit des droits d'exploitation sur des mines situées dans la zone des Topaz Mountains dans l'état de l'Utah et commença à développer des techniques d'extraction de ces minerais.

En 1971, Brush acheta la division SK Wellman de la Société Abex Corporation, producteur de matériaux de frictions métalliques et en graphite. C'est à cette époque que la compagnie changea son nom en Brush Wellman. La division SK Wellman devait être revendue ultérieurement.

Les années 80 ont été des années de forte expansion pour la compagnie qui créa trois filiales, en Angleterre (B.W. Ltd), en RFA (B.W. GmbH) et au Japon (B.W. Japan Ltd).

Enfin il y eut l'acquisition de Technical Materials Inc. (T.M.I), société spécialisée dans les métaux plaqués, avant l'achat en 1986 de la société Williams Gold Refining Co. Inc qui permit à la compagnie de prendre pied dans le raffinage et le laminage des métaux précieux.

En 1987, une unité de fabrication démarrait au Japon pour servir le marché asiatique.

Exploitation minière et fabrication

Le processus d'élaboration des alliages de cuivre au béryllium démarre à partir des mines de Topaz Spor dans l'Utah. Il s'agit du seul gisement de bertrandite connu dans le monde libre à ce jour.

Le minerai est extrait à ciel ouvert et alimente l'usine de Delta (Utah) qui transforme ce minerai brut en hydroxyde de béryllium. Cet hydroxyde est ensuite acheminé vers l'usine d'Elmore (Ohio) où s'effectue l'élaboration des alliages.

Usine d'Elmore :

On y effectue les opérations suivantes :

- Réduction de l'hydroxyde de béryllium
- Fusion et coulée
- Laminage à chaud et à froid
- Extrusion/filage à chaud
- Étirage à froid
- Mise en solution et revenu
- Décapage
- Planage
- Redressage
- Sciage
- Revêtement de surface
- Usinage.

Cette usine fabrique des feuilards, fils, barres, extrusions, pièces usinées, tôles, lingotins de refusion et alliages-mère. Tous les produits sont soit livrés aux distributeurs, soit envoyés à l'usine de Reading pour parachèvement.

Usine de Reading :

C'est là que sont produits les feuilards fins et les fils. Les différentes opérations auxquelles ont procédé sont :

- Laminage
- Étirage et tréfilage
- Décapage
- Mise en solution
- Revenu
- Dégraissage

- Refendage
- Soudure
- Trancanage

Les feuilards sont normalement laminés jusqu'à 0,05 mm et les fils tréfilés jusqu'à 1,27 mm.

La qualité

Il s'agit de la priorité numéro 1 pour chacun des membres du personnel de Brush Wellman.

Un programme de formation du personnel fonctionne en continu. Des investissements améliorent sans cesse l'outil de production et maintiennent la conscience de la nécessaire évolution des moyens de fabrication, ceci en collaboration avec les vendeurs, les distributeurs et les clients.

De plus :

- Un programme SPC (Statistical Process Control) a été mis en place pour définir les spécifications et capacités de production, éliminer les causes de discontinuité et fournir des informations quantifiables pour l'amélioration et la stabilisation des processus de fabrication.
- Les services commerciaux et les services de contrôle de la qualité travaillent en étroite collaboration avec les clients pour comprendre et satisfaire aux spécifications particulières.
- Les certificats d'essais garantissent la conformité aux normes.
- Une traçabilité parfaite est maintenue tout au long du processus de fabrication.
- Le système est régi par la norme **MIL-I-45208**.

La politique de la qualité de Brush Wellman peut se résumer dans une formule qui guide tout le comportement de la compagnie.

Nous sommes tenus de livrer en temps voulu à tous nos clients des matériaux et des services compétitifs et sans défauts répondant toujours à leurs exigences.