

B

Nr. 3738.

Polltechnika Warszawska

SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES
DES
ALLIAGES CUIVRE-ÉTAIN

PAR

MM. W. BRONIEWSKI et Z. WAWRZYNKIEWICZ



(Article extrait de *La Revue de Fonderie Moderne.*)

SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES ALLIAGES CUIVRE-ÉTAIN

par MM. W. Broniewski et Z. Wawrzynkiewicz.

Les bronzes d'étain font partie des alliages les plus anciens et les plus répandus. Leurs propriétés mécaniques ont pourtant été peu étudiées et les nombres qu'on leur attribue sont assez contradictoires. La cause de ce fait est due surtout à l'influence prépondérante du traitement thermique des échantillons avant l'essai.

Structure.

La composition des bronzes techniques se trouve placée entre le cuivre et le composé Cu₃Sn; la courbe d'équilibre de ces alliages étant reproduite sur la figure 1.

Le composé Cu₃Sn se solidifie à 752° et subit une transformation allotropique vers 585°. La solution solide de l'étain dans le cuivre s'étend jusqu'à 12 % au solidus et jusqu'à 13 % à la température ordinaire. La solution solide du cuivre dans le composé Cu₃Sn s'étend de 26 à 32 % au solidus, alors que la transformation allotropique du composé réduit presque complètement sa faculté de dissoudre le cuivre. Cette transformation, semblable à celle du fer γ en fer β , a pour effet la formation d'un eutectoïde à 525° contenant 28,5 % d'étain et semblable à la perlitte.

Pendant la solidification des bronzes, des cristaux se déposent en premier lieu, qui sont plus riches en cuivre que le liquide, lequel s'enrichit ainsi en étain, ce qui donne un alliage nettement hétérogène, même dans le domaine de la solution

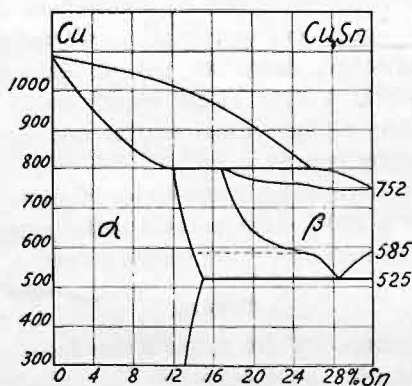


Fig. 1. — Diagramme de fusion des alliages cuivre-étain riches en cuivre (1).

(Le pourcentage d'étain est donné en poids.)

(1) Broniewski, Jablonski et Maj, C.R. 202 (1936), p. 305.

solide α . L'homogénéisation par diffusion à l'état solide a lieu très lentement et ne s'accomplit que par un recuit de plusieurs jours à haute température, condition qui a bien rarement lieu pour les alliages industriels.

Les alliages dont la teneur en étain dépasse les limites de la solution solide α peuvent subir une trempe à une température supérieure à 525°. Les cristaux de la combinaison Cu₃Sn, qui font partie des alliages cuivre-étain dépassant 13 %, dissolvent alors du cuivre et le maintiennent en solution lors d'une trempe. Ainsi, à haute température, le bronze à forte teneur d'étain est bien plus

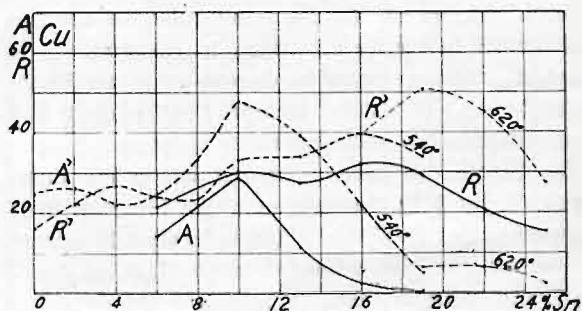


Fig. 2. — Résistance à la traction R et R' et allongement A et A' des alliages cuivre-étain suivant MM. Shepherd et Upton. La ligne continue correspond aux alliages recuits R et A, la ligne interrompue aux alliages trempés R' et A'.

(Le pourcentage d'étain est donné en poids.)

malléable qu'à la température ordinaire et l'alliage trempé manifeste des propriétés mécaniques meilleures qu'à l'état recuit, comme l'avait déjà établi Riche (1).

Historique

L'étude des bronzes à la traction avait été faite par MM. Shepperd et Upton (2) après trempe et après recuit. Pour le recuit, les alliages étaient chauffés pendant sept jours à 400° et refroidis lentement. La trempe était faite à l'eau sur des échantillons chauffés préalablement pendant sept jours à 540°; certains échantillons étaient trempés à 620°. L'allongement était mesuré sur des

(1) Riche, *Ann. Chim. et Phys.*, sér. 4, 30 (1873), p. 416.

(2) Sheperd et Upton, *Jour. Physical Chemistry*, 9/1905, p. 44.

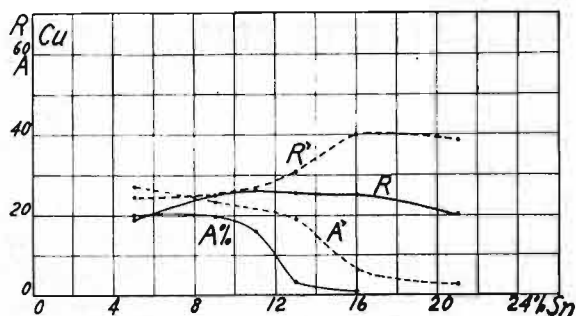


Fig. 3. — Résistance à la traction R et R' et allongement A et A' des alliages cuivre-étain, suivant M. Guillet. La ligne continue correspond aux alliages recuits R et A et la ligne interrompue aux alliages trempés R' et A'. (Le pourcentage d'étain est donné en poids.)

éprouvettes où la distance entre repères équivalait à sept fois leur diamètre.

Les résultats ainsi obtenus, recalculés en kilos par mm², sont reproduits sur la figure 2.

M. L. Guillet (1) étudia pour quelques bronzes industriels la limite élastique, la résistance à la traction, l'allongement, la dureté et la résilience à l'état recuit et à l'état trempé. Les figures 3 et 4 reproduisent les nombres ainsi obtenus.

La dureté des bronzes industriels a été aussi mesurée par MM. Matsuda et Shiba (2). MM. Broniewski (2) et Hackiewicz (3) indiquent la dureté Brinell de tous les alliages cuivre-étain en fonction de la composition.

L'étude de la résilience de quelques bronzes industriels fut reprise par MM. Guillet et Bernard (4) à la température ordinaire et par M. Kent (5) en fonction de la température.

(1) L. Guillet, Etude industrielle des alliages métalliques, Paris, 1906, p. 494.

(2) Matsuda et Shiba, Sc. Rep. Tôhoku Imp. Univ., 1/, 13/1924/, p. 413.

(3) Broniewski et Hackiewicz, C.R. 187/1928/ p. 651; Revue de Métall. 25/1928/ p. 674, 26/1929/ p. 20.

(4) Guillet et Bernard, C.R. 157/1913/ p. 548.

(5) Kent, J. Inst. Mét., 21/1926/ p. 45.

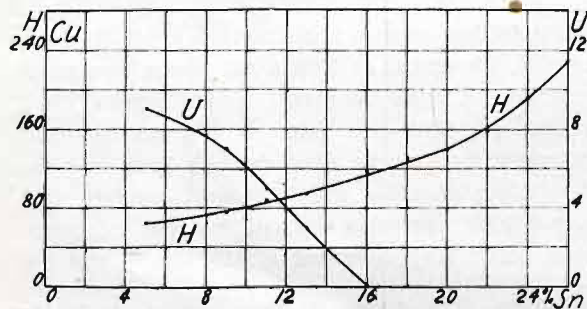


Fig. 4. — Dureté Brinell H et résilience U des alliages cuivre-étain recuits, suivant M. Guillet. (Le pourcentage d'étain est donné en poids.)

Préparation des échantillons.

L'alliage a été fondu au four à haute fréquence, dans des creusets en graphite pur, afin d'éliminer toute oxydation, et coulé en lingots de 17 mm. de diamètre. Les alliages, dont la teneur en étain ne dépassait pas 14 %, ont subi une homogénéisation préliminaire par un recuit de 25 heures à 675°. A partir de cette teneur en étain, l'homogénéisation se faisait par un échauffement de 75 heures à 675° suivi d'un recuit de 75 heures à 450°.

Les alliages de la première catégorie ont subi un laminage et un étirage à froid alternant avec un recuit de 2 heures vers 675°. Les alliages de la deuxième catégorie ont subi un laminage à

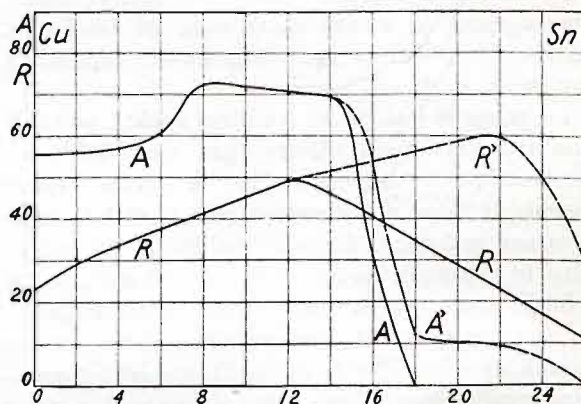


Fig. 5. — Résistance à la traction et allongement total des alliages recuits R et A et des alliages trempés R' et A'. (Le pourcentage d'étain est donné en poids.)

chaud entre 700 et 650° environ. L'entaille sur des éprouvettes de résilience n'a été faite, pour les alliages de 18 à 26 % d'étain, très fragiles, qu'après une trempe préalable.

Toutes les éprouvettes de traction et de choc ont subi après leur préparation mécanique une homogénéisation définitive par un échauffement de 75 heures à 675° et un recuit de 75 heures à 450°. Les alliages ainsi traités ont été considérés comme recuits.

Pour la trempe, les éprouvettes recuites ont été chauffées à 720°, maintenues à cette température pendant 15 minutes et refroidies à l'eau à 15°.

Mesure.

Les mesures ont été faites d'une façon normalement admise au laboratoire de métallurgie à l'Ecole Polytechnique de Varsovie et décrites dans les mémoires antérieurs (1).

(1) Voir « Revue de Fonderie Moderne » des 10 mars 1933, p. 73, et du 25 juin 1934, p. 173.

Les paramètres suivants ont été établis :

R - résistance à la traction en kg. par mm² sur fils de 5 mm. de diamètre;

Q - limite élastique, mesurée sur la courbe de traction enregistrée, donc admise comme égale à la limite de proportionnalité;

A % - allongement total à la rupture, mesuré sur éprouvettes internationales (1) dont la distance *n* entre les repères est égale à 10 fois son diamètre, soit 50 mm.;

a % - allongement uniforme calculé en mesurant le diamètre *d₀* de l'éprouvette avant l'essai et le diamètre *d₁* après rupture au voisinage des repères; on avait alors :

$$a \% = \left(\frac{d_0^2}{d_1^2} - 1 \right) 100.$$

b % - allongement de striction, établi par la différence

$$b \% = A \% - a \%$$

φ % - la striction était mesurée sur l'éprouvette rompue, à l'aide d'un microscope monté sur vis micrométrique;

H - dureté obtenue par le rapport de la pression appliquée (150 kgs pendant 5 min.) à la surface d'empreinte d'un cône de 120°; le diamètre de l'empreinte était mesuré au microscope;

U - résilience mesurée en kgm par cm² sur des éprouvettes de petit modèle allemand de 10 × 8 × 100 mm. avec entaille de 3 mm. à l'angle de 45°. Ces éprouvettes paraissent donner le plus de garantie de rupture.

(1) Afin d'obtenir l'allongement pour l'éprouvette française ou l'éprouvette anglaise courte, on peut se servir de la formule de M. Krupkowski, Revue de Métall. 1931, 28, p. 583, form. 15.

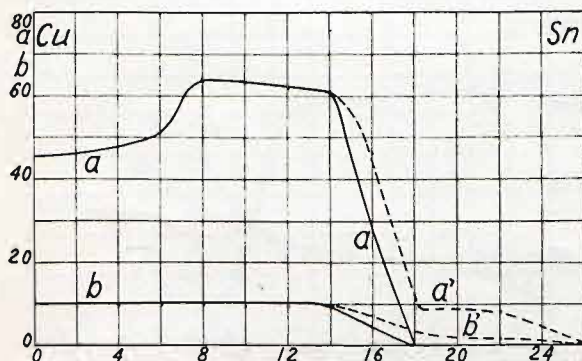


Fig. 6. — Allongement uniforme et de striction pour les alliages recuits *a* et *b* et des alliages trempés *a'* et *b'*. (Le pourcentage d'étain est donné en poids.)

Les paramètres ainsi obtenus ont permis de calculer les coefficients suivants :

$$K - \text{coefficient de Brinell égal à } \frac{R}{H}$$

T - coefficient proportionnel au travail de rupture de l'éprouvette à la traction :

$$T = A \left[Q + \frac{4}{\pi} (R-Q) \right]$$

Résultats des mesures.

Les résultats de nos essais sur les propriétés mécaniques des bronzes sont reproduits aux tableaux I et II ainsi que sur les figures 5, 6, 7, 8 et 9.

Pour les alliages recuits, la résistance à la trac-

Tableau I. — Propriétés mécaniques des bronzes recuits à 450°.

% Sn	R	Q	A %	a %	b %	φ %	H	U	K	T
0	22,9	6,1	55,9	45,0	10,9	93,5	33	13,8	0,694	10,8
2	31,2	9,3	56,2	45,9	10,3	86,1	70	13,5	0,447	14,8
4	33,2	11,0	57,1	47,5	9,6	84,9	82	13,3	0,405	16,2
6	37,0	13,8	60,8	51,3	9,5	84,4	90	13,1	0,413	19,5
8	41,0	16,7	72,1	63,3	8,8	82,7	95	12,8	0,432	25,8
10	45,5	18,8	71,2	63,1	8,1	81,1	98	12,7	0,462	28,2
12	49,8	20,7	70,3	61,5	8,8	78,4	108	12,5	0,481	30,2
14	46,5	21,0	69,8	61,1	8,7	70,0	109	9,8	0,428	28,6
16	41,1	22,1	31,9	27,6	4,3	41,2	130	2,8	0,317	11,8
18	35,0	25,0	0	0	0	0	148	1,0	0,236	0
22	23,2	21,1	0	0	0	0	232	0,2	0,100	0
26	11,3	10,3	0	0	0	0	324	0,1	0,035	0

Tableau II. — Propriétés mécaniques des bronzes trempés à 720°.

% Sn	R'	Q'	A' %	a' %	b' %	φ' %	H'	U'	K'	T'
0	22,9	6,1	55,9	45,1	10,8	93,5	33	13,8	0,694	10,8
2	31,0	9,2	56,0	45,8	10,2	86,2	70	13,6	0,445	14,7
4	33,1	11,1	57,2	47,8	9,4	85,0	82	13,3	0,404	16,3
6	38,2	13,9	60,3	50,8	9,5	81,3	90	13,2	0,425	19,8
8	41,1	16,8	73,0	64,0	9,0	82,7	95	12,8	0,433	26,2
10	45,5	18,8	71,9	62,9	9,0	80,8	99	12,7	0,458	28,2
12	49,5	20,6	70,1	61,1	9,0	78,2	109	12,6	0,457	30,2
14	50,5	21,5	69,7	60,6	9,1	70,5	110	10,6	0,459	30,4
16	54,1	23,1	53,2	46,0	7,2	61,5	146	3,1	0,364	24,2
18	57,6	33,0	12,0	9,0	3,0	21,1	212	2,0	0,276	6,3
22	60,1	39,7	9,3	8,2	1,1	15,4	252	0,7	0,238	5,1
26	29,6	27,5	0	0	0	0	287	0,6	0,103	0

tion atteint dans nos essais un maximum de 50 kgs/mm² à 12 % d'étain, alors que l'allongement passe par un maximum de 72 % pour l'alliage à 8 % d'étain (fig. 5). L'effet de la trempe se fait sentir au-dessus de 12 % d'étain et améliore simultanément la résistance à la traction et l'allongement. La résistance à la traction des alliages trempés passe ainsi par un maximum de 60 kgs/mm² pour l'alliage à 22 % d'étain. Les nombres que nous avons obtenus pour la résistance à la traction et l'allongement des alliages

cuivre-étain sont sensiblement supérieurs à ceux qui ont été indiqués précédemment, ce qui paraît être dû surtout au traitement homogénéisant que subissent nos échantillons avant l'essai.

Sur les courbes de l'allongement uniforme et de l'allongement de striction (fig. 6) on remarque la constance de ce dernier paramètre jusqu'à la limite de la solution solide. Une pareille constance avait déjà été observée dans les alliages cuivre-zinc.

La striction n'avait pas encore été mesurée pour

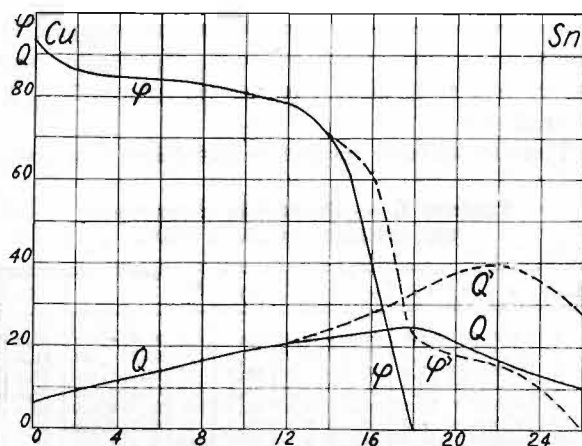


Fig. 7. — Striction et limite élastique des alliages recuits φ et Q et des alliages trempés φ' et Q' . (Le pourcentage d'étain est donné en poids.)

les alliages cuivre-étain. Nous voyons (fig. 7) que jusqu'à 10 % d'étain elle se maintient à un niveau très élevé, supérieur à 80 %, et que sa chute ne s'accroît que dans le domaine des mélanges, au-dessus de 13 %. La limite élastique apparaît dans notre étude (fig. 7) sensiblement supérieure aux nombres antérieurs, ce qui est encore attribuable au traitement thermique subi par nos alliages.

Sur la courbe de dureté (fig. 8) on remarque que la trempe augmente la dureté des alliages entre 14 et 23 % d'étain et la diminue au-dessus de cette teneur. Ce fait s'explique par la grande dureté de la combinaison Cu, Sn, dont la présence dans les mélanges peut augmenter davantage la dureté que la formation des solutions solides.

Sur la courbe de résilience (fig. 8) on voit sa chute rapide au-dessus de la limite de la solution solide. Cette chute se trouve quelque peu ralentie par la trempe, de sorte qu'un refroidissement plus rapide à la coulée des cloches les rend moins fragiles.

Le coefficient du travail de rupture à la traction (fig. 9) atteint un maximum pour le « bronze

à canon » recuit à 12 % d'étain, où sa valeur dépasse 30. Si nous considérons que pour l'acier à canon actuellement employé la valeur de ce coefficient est de beaucoup inférieure, alors que la limite élastique et la dureté du « bronze à canon » peuvent sensiblement augmenter par l'écroissage, on peut comprendre les raisons de l'emploi des canons en bronze par l'armée autrichienne encore au début de la grande guerre.

Le coefficient de Brinell (fig. 9) ne varie entre 4 et 14 % d'étain que de 0,41 à 0,46, de sorte qu'une détermination approximative de la résistance à la traction est rendue possible par la mesure de la dureté.

Résumé.

1° L'étude des propriétés mécaniques a été faite pour les bronzes laminés contenant jusqu'à 26 % d'étain. Les échantillons subissaient une homogénéisation par échauffement de 100 à 150 heures à 675° et un recuit de 150 heures à 450°. La trempe était faite à 720° sur des échantillons homogénéisés préalablement; son effet se fait sentir à partir de 12 % d'étain.

2° La résistance à la traction passe par un maximum de 50 kgs/mm² pour l'alliage recuit à 12 % d'étain et de 60 kgs/mm² pour l'alliage trempé à 22 % d'étain. L'allongement passe par un maximum de 72 % pour l'alliage à 8 % d'étain. La trempe élève simultanément la valeur de la résistance et celle de l'allongement.

3° La dureté, qui augmente assez faiblement dans le domaine des solutions solides et dépasse de peu le nombre 100 à leur limite, monte ensuite bien plus rapidement pour atteindre une valeur voisine de 300 à 26 % d'étain.

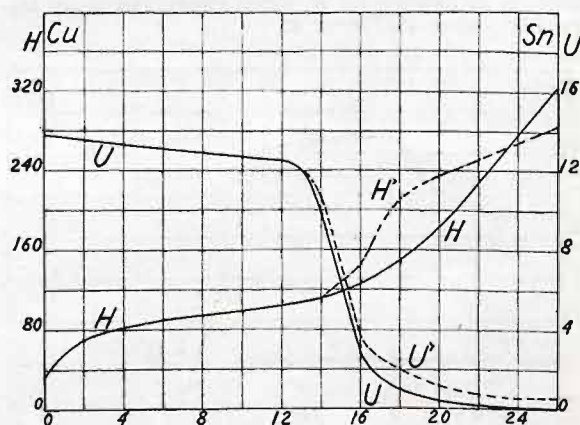


Fig. 8. — Dureté et résilience des alliages recuits H et U et des alliages trempés H' et U' . (Le pourcentage d'étain est donné en poids.)

Par contre, la résilience, qui se maintient à un niveau élevé dans les limites de la solution solide, diminue rapidement dans le domaine des mélanges de 13 à 17 % d'étain.

4° Entre les alliages étudiés, les meilleures propriétés sont constatées dans le « bronze à canon » à 12 % d'étain dont la résistance à la traction atteint 50 kgs/mm² et l'allongement à la rupture 70 % pour une dureté dépassant 100 et une forte résilience. Pour le « bronze à cloches » à 22 % d'étain, la trempe élève simultanément la résistance à la traction de 23 à 60 kgs/mm², l'allongement de 0 à 9 % et la dureté de 232 à 252.

5° Nous voyons que les bronzes à l'étain qui, traités d'une façon ordinairement admise dans l'industrie, ont à juste titre la réputation d'être médiocres au point de vue mécanique, peuvent être sensiblement améliorés par un mode de fusion excluant l'oxydation et par un traitement thermique homogénéisant. On arrive de la sorte, pour certains alliages, à doubler la résistance à la traction et à tripler l'allongement. La solution

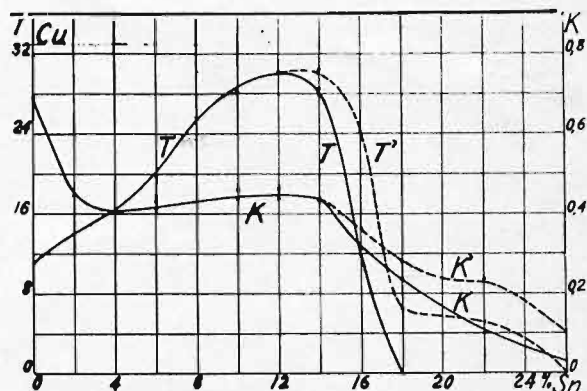


Fig. 9. — Coefficient du travail de rupture à la traction et coefficient de Brinell des alliages recuits T et K et des alliages trempés T' et K'. (Le pourcentage d'étain est donné en polds.)

solide limite de l'étain dans le cuivre, voisine de l'airain des anciens, ainsi améliorée, acquiert des propriétés qui lui permettent de soutenir la comparaison avec les meilleurs alliages connus actuellement.

BIBLIOTEKA
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
Warszawa, ul. Politechniki 1

