

SUR LE TRAITEMENT THERMIQUE ET L'ÉCROUISSAGE DE L'ALLIAGE ARGENT-CUIVRE I-ER TITRE POLONAIS (940⁰/₀₀)

par MM. W. Broniewski et M. Perlberg.

Présenté par M. W. Broniewski à la séance de l'Académie des Sciences Techniques à Varsovie le 16 juin 1937.

La structure des alliages de l'argent avec le cuivre manifeste deux solutions solides limites séparées par des mélanges eutectiques. Les diagrammes de leurs propriétés physiques, en fonction de la composition, ont été établis par un de nous en collaboration avec M. Koślacz¹⁾.

Suivant cette étude, l'eutectique fond à 779° et contient 71% d'argent, alors que M. Stockdale²⁾ le place à 71.94%. La limite des solutions solides a fait l'objet de plusieurs recherches effectuées en ces dernières années par MM. Johansson et Linde³⁾, Weinbaum⁴⁾, Ageew et Sachs⁵⁾, Ageew, Hansen et Sachs⁶⁾, Hansen⁷⁾ et Stockdale⁸⁾.

Il apparaît de ces études que la solubilité réciproque des constituants diminue très sensiblement avec la température. Ainsi, la solubilité du cuivre dans l'argent serait voisine de 8% à la température du solidus, mais tomberait au quart de cette valeur vers 400° et au voisinage de 1% à la température ordinaire. Du côté du cuivre, la limite de solubilité, voisine, elle aussi, de 8%, diminuerait plus rapidement encore, pour s'annuler, presque totalement, à la température ambiante.

Cette réduction de solubilité permettrait, suivant M. Norbury⁹⁾ et suivant MM. Fraenkel et Schaller¹⁰⁾, un traitement thermique très efficace des alliages riches en argent lors d'une trempe au-dessus de 750° et d'un revenu vers 500°.

Pour l'argenterie de table, on emploie ordinairement l'alliage argent-cuivre à 800⁰/₀₀ (2-me titre français et 5-me titre polonais) à cause de sa dureté qui à l'état brut est voisine de 72 unités Brinell et se maintient dans les services de table au voisinage de 65 unités Brinell. La structure de cet alliage se compose de cristaux blancs de la solution solide limite, riche en argent, entourés d'un eutectique dont la couleur jaune est due aux

1) Broniewski et Koślacz, C. R., 1932, CXCIV, p. 973; Prace Zakładu Metalurgicznego, t. III, 1933, p. 46, Ed. Acad. Sc. Techn. Varsovie (en polonais avec résumé français).

2) Stockdale, J. Inst. Met., 1930, XLIII, p. 493.

3) Johansson et Linde, Zs. f. Metallkunde, 1928, XX, p. 443.

4) Weinbaum, Zs. f. Metallkunde, 1929, XXI, p. 397.

5) Ageew, et Sachs, Z. Physik, 1930, LXIII, p. 293.

6) Ageew, Hansen et Sachs, Z. Physik, 1930, LXVI, p. 350.

7) Hansen, Zs. f. Metallkunde, 1929, XXI, p. 181.

8) Stockdale, J. Inst. Met., 1931, XLV, p. 127.

9) Norbury, J. Inst. Met., 1928, XXXIX, p. 145.

10) Fraenkel et Schaller, Zs. f. Metallkunde, 1928, XX, p. 237.

cristaux de la solution solide riche en cuivre qui en font partie. De ce fait, cet alliage a une teinte jaunâtre qu'on fait disparaître superficiellement en immergeant l'alliage chauffé dans de l'acide sulfurique étendu, qui ne ronge alors que les cristaux riches en cuivre. Ce traitement a le désavantage de faire disparaître l'écronissage subi pendant la fabrication et de réduire, par conséquence, la dureté.

L'alliage à 940⁰/₁₀₀ d'argent (1-er titre polonais) possède à l'état brut une dureté voisine de 50 unités Brinell censée être trop faible pour la production d'argenterie est rarement employé à cet effet malgré son bel aspect d'argent pur.

Nous avons donc cru utile de faire pour cet alliage une étude du traitement thermique, suivie d'un écronissage afin de constater, si par ce traitement l'alliage à 940⁰/₁₀₀ ne devenait pas apte à remplacer l'alliage à 800⁰/₁₀₀.

Préparation des échantillons et mesures. La fusion de l'alliage se faisait au four à haute fréquence dans des creusets de graphite permettant d'éviter toute oxydation. L'alliage était ensuite coulé en lingots de 18 mm de diamètre que par laminage et étirage successifs à froid, suivis de recuit, on ramenait aux dimensions de barres de 5 mm de diamètre.

Les paramètres suivants ont été établis:

R — résistance à la traction en kgs par mm² sur fils de 5 mm de diamètre.

Q — limite élastique, mesurée sur la courbe de traction enregistrée, donc admise égale à la limite de proportionnalité.

$A^0/0$ — allongement total à la rupture, mesuré sur éprouvette internationale¹⁾, dont la distance entre les repères est $n = 10$ fois son diamètre, soit 50 mm.

$a^0/0$ — allongement uniforme, calculé en mesurant le diamètre de l'éprouvette avant l'essai (d_0) et après rupture (d_1) au voisinage des repères. On avait alors

$$a^0/0 = \left(\frac{d_0^2}{d_1^2} - 1 \right) 100$$

$b^0/0$ — allongement de striction, établi par la différence $b^0/0 = A^0/0 - a^0/0$.

$C^0/0$ — la striction, mesurée, sur l'éprouvette rompue, à l'aide d'un microscope monté sur vis micrométrique.

T — Surface du diagramme de traction, proportionnelle au travail de rupture de l'éprouvette. Pour les alliages non écrouis ce facteur peut être calculé par la formule²⁾

$$T = QA + \frac{\pi}{4} (R - Q) A \text{ ou approximativement } = A \frac{5R + Q}{4}$$

Le travail de rupture, exprimé en kilogrammètres, est alors égal à $\frac{Sl}{10^3} T$ où S est la section et l la distance entre repères de l'éprouvette exprimés en mm. Pour les éprouvettes employées dans cette étude $Sl \cdot 10^{-3} = 0,98$, et peut être approximativement admis comme égal à 1.

H — dureté Brinell, obtenue par le rapport de la pression de 12 kgs à la surface d'empreinte d'une bille de 5 mm et corrigée afin d'équivaloir à la dureté Brinell normale ($D = 10$ mm, $P = 500$ kgs).

K — coefficient $\frac{R}{H}$.

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 Mét., 1931, XXVIII, p. 583, form. 15.

²⁾ Broniewski et Lewandowski, La Revue de Fonderie Moderne, 1933, 27, p. 175.

Les essais successifs comprenaient le recuit, la trempe, l'étude du revenu de l'alliage trempé et l'étude de l'écrouissage de l'alliage revenu.

Etude du recuit. L'alliage chauffé pendant 2 heures à 750° et refroidi au four en 48 heures jusqu'à la température ordinaire manifeste les paramètres suivants

<i>R</i>	<i>Q</i>	<i>A</i> °/°	<i>a</i> °/°	<i>b</i> °/°	<i>C</i> °/°	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>T</i>
25,7	11,5	28,0	21,6	6,4	57,6	41	0,58	5,88

Etude de la trempe. Afin de déterminer la température minimum de la trempe, où tout le cuivre passe en solution solide, les échantillons étaient maintenus pendant 2 heures à la température θ° et trempés à l'eau.

On mesurait ensuite les paramètres mécaniques (tableaux I, et fig. 1), la résistance électrique à 0 et 100° ainsi que le coefficient de température de la résistance entre ces limites (tableau II et fig. 2).

Nous voyons (fig. 1) que les allongements à la traction *A*°/°, *a*°/° et *b*°/° ainsi que la striction *C*°/° passent par un maximum entre 600 et 650° et qu'il en est de même pour le travail de rupture *T* (tableau I). La dureté *H* et la limite élastique *Q* manifestent une chute moins rapide à partir de 650—700°, alors que la chute de la résistance *R* apparaît uniforme jusqu'à 800°.

La montée des courbes de la résistance électrique (fig. 2) s'accélère entre 650 et 750°, et s'annule presque à partir de cette température. Le coefficient de température de la résistance électrique passe par un maximum vers 650°.

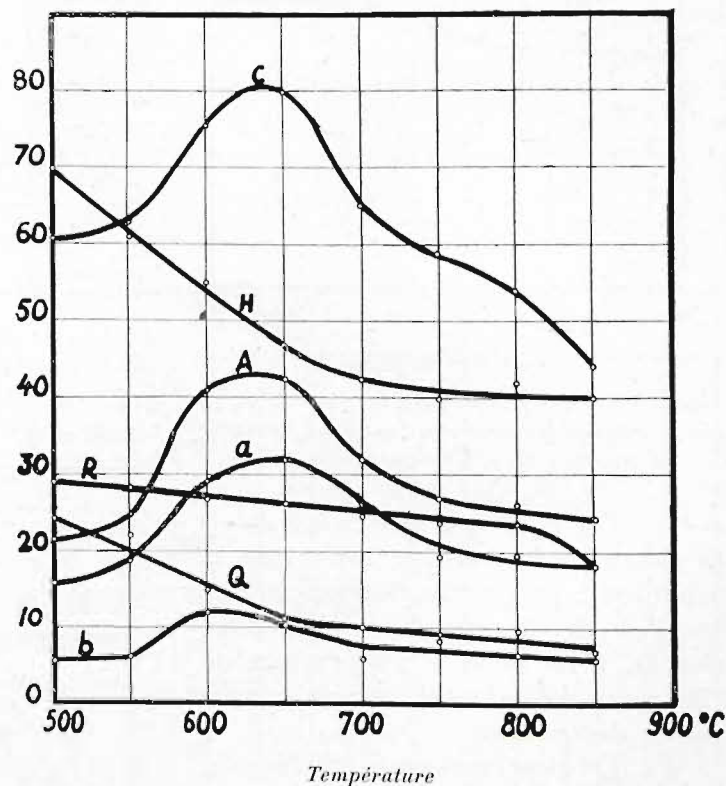


Fig. 1. Propriétés mécaniques en fonction de la température de trempe.

TABLEAU I.
Propriétés mécaniques en fonction de la température de trempe θ .

θ °C	<i>R</i> kg/mm ²	<i>Q</i> kg/mm ²	<i>A</i> °/°	<i>a</i> °/°	<i>b</i> °/°	<i>C</i> °/°	<i>H</i> kg/mm ²	10 <i>K</i>	<i>T</i> kgm
500	29,10	24,15	21,4	15,1	6,3	60,7	69,8	4,17	5,71
550	28,25	21,90	24,7	18,6	6,1	62,8	60,8	4,65	6,28
600	26,70	15,10	41,1	29,0	12,1	74,5	55,3	4,82	9,51
650	26,35	11,05	42,4	32,0	10,4	79,9	47,1	5,60	9,35
700	24,60	9,95	32,0	26,0	6,0	65,3	42,4	5,82	6,56
750	23,80	9,30	27,1	18,8	8,3	58,8	40,0	5,65	5,35
800	23,68	9,70	26,2	19,5	6,7	54,0	42,1	5,62	5,00
850	18,15	7,00	24,3	18,2	6,1	44,3	40,0	4,51	3,66

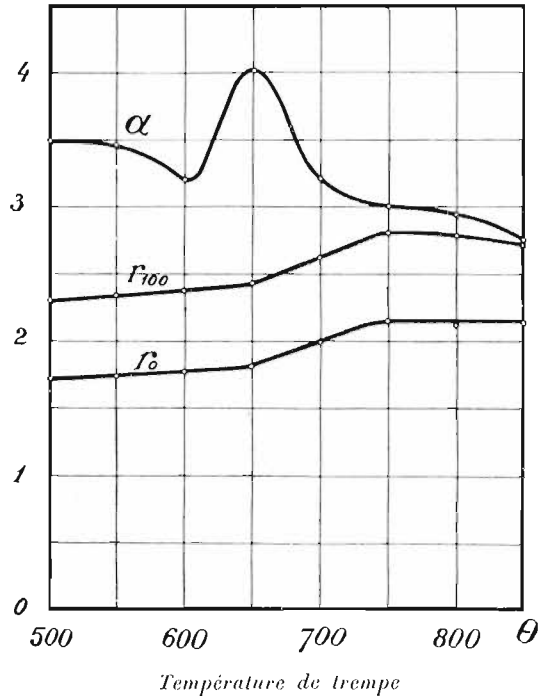


Fig. 2. Résistance électrique à 0 et 100°, ainsi que son coefficient de température entre ces limites (α) en fonction de la température de trempe.

TABLEAU II.

Résistance électrique en fonction de la température de trempe θ . r_0 — résistance électrique à 0°; r_{100} — résistance électrique à 100°; α — coefficient de température de la résistance électrique entre 0 et 100°.

θ °C	r_0 10 ³	r_{100} 10 ³	α 10 ³
500	1,707	2,500	3,510
550	1,735	2,536	3,470
600	1,785	2,565	3,200
650	1,792	2,426	4,030
700	1,988	2,650	3,220
750	2,152	2,800	3,000
800	2,113	2,777	2,963
850	2,140	2,725	2,734

On peut conclure de ces essais qu'une trempe douce vers 650° améliore sensiblement la plasticité de l'alliage, mais que la phase riche en cuivre ne paraît entrer en solution solide qu'à partir d'une trempe à 750°, ce qui se manifeste particulièrement par l'allure des courbes de la résistance électrique (fig. 2). C'est donc la température de 750° qui a été adoptée comme température de trempe.

On peut remarquer que les propriétés mécaniques de l'alliage trempé à cette température se rapprochent sensiblement de celles de l'alliage recuit, bien que la structure diffère essentiellement dans les deux cas, étant hétérogène pour l'alliage recuit et homogène pour l'alliage trempé. Mais c'est l'aptitude au revenu qui caractérise particulièrement l'alliage trempé et le distingue de l'alliage recuit.

Etude du revenu. Les alliages trempés à 750°, après un séjour de 2 heures dans le four, étaient soumis au revenu à des températures variables entre 100 et 500° pendant un temps de 15 à 120 minutes. Les échantillons ainsi traités, furent polis à leur extrémités, comme pour la micrographie et subissaient chacun trois empreintes microscopiques de dureté Brinell.

Les résultats de cette étude sont indiqués au tableau III et sur la figure 3.

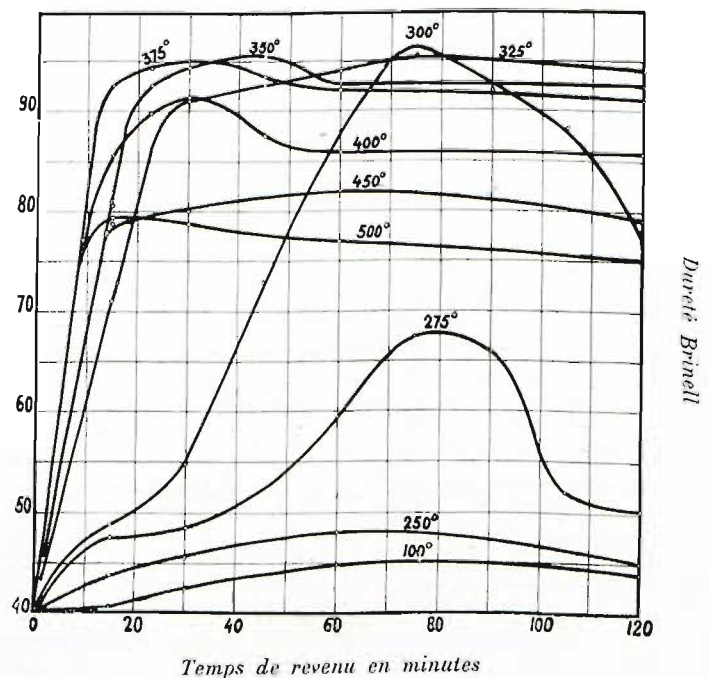


Fig. 3. Dureté de l'alliage revenu après trempe en fonction de la température et du temps de revenu.

TAB LEAU III.

Dureté de l'alliage revenu après trempe en fonction de la température (*t*) et du temps de revenu.

<i>t</i> °C	temps de revenu en minutes									Dureté
	15	22,5	50	45	60	75	90	105	120	
100	40,5	—	42,6	—	46,8	—	—	—	45,8	
250	45,8	—	45,4	—	48,0	—	—	—	45,0	
275	47,5	—	48,4	—	59,5	67,6	66,0	52,0	50,2	
300	48,7	—	54,7	72,9	88,0	96,4	92,0	88,5	76,9	
325	71,0	—	91,0	92,5	94,0	95,0	95,0	—	94,0	
350	80,6	92,4	94,2	95,6	92,8	—	—	—	92,4	
375	92,6	94,5	95,0	93,4	92,2	—	—	—	91,1	
400	85,6	89,7	91,5	87,5	86,0	—	—	—	85,6	
450	78,6	—	80,1	—	82,1	—	—	—	79,1	
500	79,0	—	78,6	—	77,1	—	—	—	75,1	

Nous voyons (fig. 5) que la dureté des alliages revenus passe par un maximum voisin de 95 unités pour des températures de revenu variables entre 300 et 375° et se trouve atteint en un temps d'autant plus court, que la température de revenu est plus élevée. Sur la base de ces données, nous avons admis un revenu de 50 minutes à 350°, en prenant en considération que l'écroutissage complète quelque peu l'action du revenu.

Etude de l'écroutissage. L'alliage trempé à 750° et revenu pendant 30 minutes à 350° était écrouti par laminage et étirage. On mesurait l'écroutissage $Z\%$ par la formule:

$$Z\% = \frac{S_0 - S_1}{S_0} 100$$

où S_0 est la section de l'échantillon avant et S_1 après l'écroutissage.

Les résultats obtenus pour les paramètres mécaniques des alliages écroutis sont indiqués au tableau IV et sur la figure 4.

En plus des paramètres indiqués précédemment, a été calculé $P = R (I - Z)$ où R est la résistance à la traction et Z l'écroutissage. Ce paramètre, exprimé donc en kgs la résistance effective d'un fil ayant à l'état non écrouti 1 mm² de section qui se trouve réduite par des écroutissages successifs.

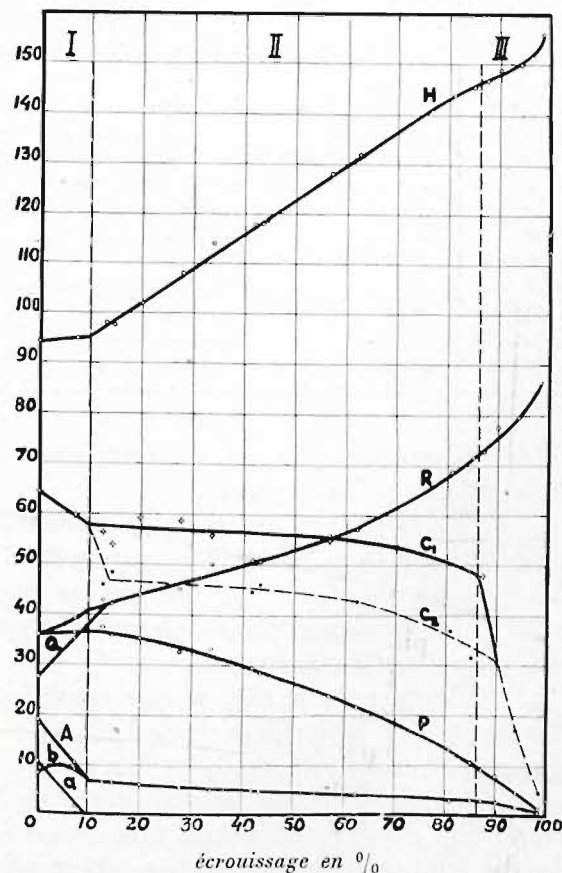


Fig. 4. Propriétés mécaniques de l'alliage revenu 30 min. à 350° en fonction de l'écroutissage. H — dureté Brinell; R — résistance à la traction; Q — limite élastique; C_1 — striction maxima (rupture en cône); C_2 — striction minima (rupture en biseau); A — allongement total à la rupture; a — allongement proportionnel; b — allongement de striction; $P = R (I - Z)$.

TABLEAU IV.
Propriétés mécaniques de l'alliage revenu en fonction de l'écroutissage Z .

Z %	R kg/mm ²	Q kg/mm ²	A %	a %	b %	P kg/mm ²	C		H kg/mm ²	10 K	T kgm
							C_1 %	C_2 %			
0	55,7	27,2	19,10	10,84	8,30	55,7	64,5	—	94,2	5,79	6,46
7,24	59,0	54,9	10,47	1,20	9,27	56,2	59,7	—	95,0	4,10	3,99
12,80	42,7	42,0	6,57	0,57	6,00	57,2	56,4	45,9	98,0	4,27	2,71
14,45	41,8	41,8	6,54	0,50	6,04	55,7	55,6	48,5	97,5	4,28	2,75
19,95	44,1	44,1	6,25	1,10	5,15	55,5	59,4	—	101,7	4,45	2,75
27,80	45,0	45,0	5,49	0,75	4,74	52,5	58,8	—	108,0	4,17	2,45
35,84	50,5	50,5	5,00	0,80	4,20	55,5	55,8	—	114,0	4,42	2,58
42,10	50,8	50,8	5,09	0,79	4,50	29,4	—	44,7	117,4	4,55	2,55
45,50	50,4	50,4	4,88	0,60	4,28	28,5	—	46,4	118,0	4,27	2,46
57,10	56,0	56,0	5,48	1,45	4,05	24,0	55,1	—	128,0	4,40	2,80
62,40	57,2	57,2	4,22	1,22	5,00	21,5	—	42,8	151,7	4,54	2,41
80,80	68,6	68,6	2,85	0,16	2,67	15,2	—	57,1	144,0	4,76	1,94
85,00	72,1	72,1	5,05	0,40	2,65	10,8	—	51,4	145,5	4,96	2,20
87,20	72,8	72,8	5,00	0,20	2,80	9,5	47,1	—	146,5	4,97	2,18
89,80	77,5	77,5	2,65	—	2,65	7,9	—	50,4	149,0	5,20	2,05
94,00	79,4	79,4	1,47	—	1,47	4,8	—	17,0	150,2	5,28	1,17
98,54	86,4	86,4	0,84	—	0,84	1,5	—	4,6	156,0	5,54	0,72

Comme pour les alliages précédemment étudiés ¹⁾, on remarque pour celui-ci trois phases d'écroutissage.

La première de ces phases, marquée surtout par la disparition de l'allongement proportionnel $a\%$, paraît s'étendre jusqu'à un écroutissage de 10%, alors que la formule de M. Krupkowski ²⁾ fait prévoir sa limite à 9,7%.

La troisième phase, marquée surtout par la chute de la striction $C\%$, paraît s'étendre à partir d'un écroutissage voisin de 87%.

Nous voyons (fig. 4) que dans les limites de la première phase d'écroutissage la dureté H et le paramètre P de l'alliage ne varient presque pas, alors que l'allongement $A\%$ diminue presque de moitié. Par contre, dans la deuxième phase d'écroutissage, la dureté croît rapidement et on atteint pour un écroutissage de 50%, facilement accessible dans l'industrie de l'argenterie de table, une dureté voisine de 110 dépassant sensiblement la dureté courante de l'argenterie fabriquée avec l'alliage à 800⁰/₀₀ d'argent. L'allongement

¹⁾ Broniewski et Krol, C. R. 1931, 193 p. 38; Prace Zakł. Metalurg. Pol. Warsz. 1933 t. III p. 27 (fer Armeo).

Broniewski et Pełczyński, Revue de Métall. 1934, 31 pp. 48 et 90; Prace Zakł. Metalurg. Pol. Warsz. 1934 t. IV p. 17 (laitons).

Broniewski et Szereniawski, Revue de Métall. 1936, 33, p. 442. (Congrès Intern. des Mines et de Métallurgie, Paris 1935 t. II p.

²⁾ Krupkowski, Revue de Métall. 1931, 28 p. 540, formule N. 37.

se maintient alors vers 5% pour $R = 50 \text{ kg/mm}^2$, en assurant une élasticité suffisante. Comme l'argenterie de table, fabriquée avec l'alliage à 940‰ d'argent, ne demande aucun blanchissement complémentaire, la dureté, acquise par le revenu et l'écroissage, se trouve maintenue définitivement.

R é s u m é.

1. Une étude de l'alliage argent-cuivre à 940‰ d'argent (I titre polonais) a été faite en vue de son application pour l'argenterie de table ordinairement exécutée avec l'alliage à 800‰ d'argent à une dureté voisine de 65 unités Brinell.

2. L'alliage à 940‰ d'argent bien recuit a une dureté voisine de 40 unités Brinell, une résistance à la traction voisine de 24 kg/mm^2 et un allongement à la rupture de 28%. La trempe à 750° fait entrer le cuivre en solution solide avec l'argent mais ne modifie presque pas les propriétés mécaniques de l'alliage.

3. Un revenu de 30 minutes à 350° , appliqué à l'alliage trempé, élève sa dureté vers 95 unités Brinell, sa résistance à la traction à 36 kg/mm^2 alors que l'allongement à la traction est voisin de 19%.

4. L'alliage à 940‰ d'argent ne demande pas de blanchissement complémentaire et peut être appliqué après trempe et revenu à la fabrication d'argenterie de table qui prend alors une dureté voisine de 110 unités avec une résistance à la traction de 50 kg/mm^2 et un allongement de 5%, en conservant encore une élasticité suffisante pour les applications pratiques.

