

L'influence de la température et de l'érouissage sur les propriétés mécaniques d'un bronze pour médailles

par MM. W. BRONIEWSKI et J. SZRENIAWSKI

Ecole Polytechnique de Varsovie

L'alliage étudié contenant 5 p. 100 d'étain et 95 p. 100 de cuivre, était fondu au four à haute fréquence dans un creuset en graphite et coulé en lingots. Afin de homogénéiser l'alliage et faire disparaître les dendrites de ségrégation primaire, les lingots subissaient un recuit de 12 heures à 700°. La transformation de ces lingots de 18 mm. de diamètre en fils et en barres avait alors lieu par laminage et étirage à froid entrecoupé, après chaque érouissage de 25 %, par un recuit de 30 min. à 600°.

Les mesures étaient faites d'une façon normalement admise au Laboratoire de Métallurgie, à l'Ecole Polytechnique de Varsovie, et décrite dans les mémoires antérieurs (1).

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 comme égale à la limite de proportionnalité.

A % : allongement total à la rupture, mesuré sur éprouvette internationale (2), dont la distance entre les repères est $n=10$ fois son diamètre, soit 50 mm.

a % : allongement uniforme, fut 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 :

$$a \% = \frac{d_0^2}{d_1^2} - 1/100.$$

(1) Broniewski et Wesolowski : Influence de la température sur les propriétés mécaniques des laitons. Revue de Métall., 1933, XXX, p. 396 et 453.

Broniewski et Pelczynski : Sur l'érouissage, le revenu et le recuit des laitons. Revue de Métall., 1934, XXXI, p. 48 et 90.

(2) 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, XXVIII, p. 583, form. 15.

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.

T : travail de rupture des éprouvettes ($d_0=5$ mm.) à la traction, obtenu par planimétrage de la courbe de traction enregistrée et exprimé en kgm. Pour les alliages non érouis ce paramètre peut être calculé avec une approximation suffisante (1) par la formule :

$$T = QA + \frac{\pi}{4} / R - QA.$$

H_n : dureté Brinell obtenue par le rapport de la pression de 12 kgs à la surface d'empreinte d'une bille de 3 mm. et corrigée afin d'équivaloir à la dureté Brinell normale ($D=10$ mm. $P=500$ kgs).

H_c : dureté obtenue par le rapport de la pression de 25 kgs (appliquée 6 min.) à la surface d'empreinte d'un cône de 120°.

K : coefficient = $\frac{R}{H_n}$

U : résilience en kgs par cm² sur petite éprouvette allemande de 100 × 10 × 8 mm. avec entaille de 3 mm. à l'angle de 45° qui donnait le plus de garantie de rupture.

Influence de la température. — L'étude se faisait parallèlement sur des échantillons érouis à 50 % par réduction à froid de leur section de moitié et sur des échantillons recuits par échauffement de 30 min. à 600°. Les mesures étaient faites entre la température de l'air liquide et 700°, les essais de traction et de dureté à chaud se faisant dans une atmosphère de CO₂.

Les résultats de ces mesures sont indiqués sur

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

Tableau I. — Influence de la température /t/ sur les propriétés mécaniques d'un bronze pour médailles recuit.

| t | R | Q | A % | a % | b % | ϕ % | H _c | U |
|------|------|------|------|------|------|------|----------------|------|
| -183 | 47,7 | 22,2 | 54,0 | 41,7 | 12,3 | 78,7 | 159 | 17,8 |
| -78 | 39,6 | 17,3 | 56,0 | 43,5 | 12,5 | 79,6 | 110 | 15,1 |
| 20 | 33,4 | 12,2 | 55,1 | 41,5 | 13,6 | 83,0 | 74 | 11,6 |
| 100 | 33,4 | 11,8 | 48,0 | 36,1 | 11,9 | 82,1 | 72 | 10,7 |
| 200 | 32,8 | 11,3 | 41,5 | 31,2 | 10,3 | 83,6 | 72 | 9,1 |
| 300 | 31,3 | 10,5 | 32,4 | 24,1 | 8,3 | 33,2 | 70 | 5,4 |
| 400 | 26,3 | 9,8 | 25,0 | 15,6 | 9,4 | 23,1 | 47 | 2,3 |
| 450 | — | — | — | — | — | — | 39 | — |
| 500 | 18,6 | 8,5 | 20,6 | 12,2 | 8,4 | 18,5 | 30 | 1,3 |
| 550 | — | — | — | — | — | — | 20 | — |
| 600 | 9,9 | 6,2 | 12,5 | 5,1 | 7,4 | 13,1 | 16 | 1,0 |
| 700 | 5,6 | 4,1 | 8,2 | 3,5 | 4,7 | 12,6 | 8 | 0,8 |

les tableaux I et II ainsi que sur les figures 1, 2, 3 et 4.

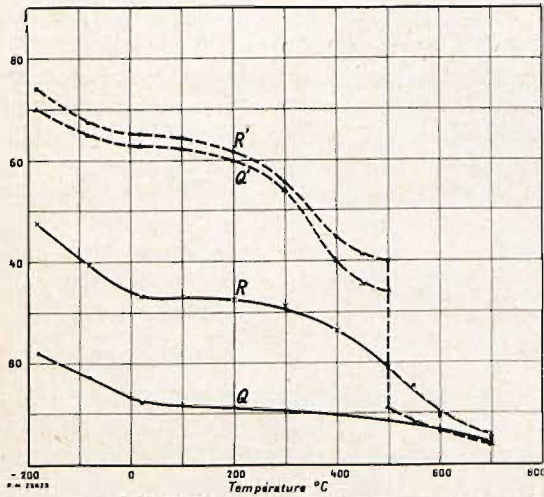


Fig. 1. — Q et R, limite élastique et résistance à la traction de l'alliage recuit; Q' et R', les mêmes paramètres pour l'alliage écroui à 50 p. 100.

Nous voyons que la chute de la résistance à la traction et de la limite élastique (fig. 1) en fonction de la température se trouve ralentie entre la tem-

Tableau II. — Influence de la température /t/ sur les propriétés mécaniques d'un bronze pour médailles écroui à 50 %

| t | R' | Q' | A % | a' % | b' % | ϕ' % | H' _c | U' |
|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|-----|
| -183 | 74,2 | 70,1 | 25,8 | 20,1 | 5,7 | 50,1 | 280 | 4,7 |
| -78 | 67,5 | 65,3 | 8,6 | 0,8 | 7,8 | 56,7 | 222 | 4,0 |
| 20 | 65,4 | 63,3 | 8,6 | 0,7 | 7,9 | 66,0 | 181 | 3,5 |
| 100 | 64,6 | 62,6 | 5,9 | 1,1 | 4,8 | 61,9 | 172 | 2,8 |
| 200 | 61,6 | 59,6 | 6,6 | 1, | 5,5 | 64,4 | 148 | 3,0 |
| 300 | 56,3 | 54,1 | 10,1 | 4,7 | 5,4 | 29,3 | 115 | 1,6 |
| 400 | 44,7 | 40,5 | 9,0 | 2,9 | 6,1 | 21,8 | 68 | 1,9 |
| 450 | 41,3 | 35,5 | 8,0 | 1,3 | 6,7 | 19,5 | 31 | — |
| 500 | 39,8 | 34,0 | 7,4 | 1,8 | 5,6 | 17,8 | 19 | 0,9 |
| » | 19,2 | 11,7 | 22,2 | 8,2 | 14,0 | 31,1 | — | — |
| 550 | 15,6 | 8,37 | 20,6 | 7,8 | 12,8 | 32,3 | 13 | — |
| 600 | 9,8 | 7,4 | 12,9 | 5,5 | 7,4 | 16,4 | 11 | 1,0 |
| 700 | 5,3 | 4,1 | 8,1 | 2,8 | 5,3 | 9,2 | 8 | 1,4 |

pérature ordinaire et 200° environ. Vers 500° a lieu la disparition de l'érouissage, de sorte que les valeurs de Q' et R' se rapprochent de Q et R.

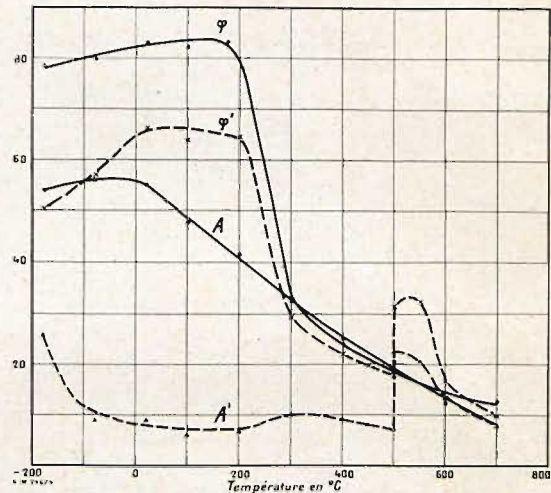


Fig. 2. — A et ρ, allongement total à la rupture et striction pour l'alliage recuit; A' et ρ', les mêmes paramètres pour l'alliage écroui à 50 %.

L'allongement à la rupture et la striction (fig. 2) passent par un maximum. A la perte de l'érouissage vers 500° ces deux paramètres montent si brusquement, pour les alliages préalablement écrouis, qu'ils dépassent les valeurs correspondantes de l'alliage recuit et ne se confondent avec elles que vers 700°.

L'allongement de striction (fig. 3) varie assez faiblement, en fonction de la température, aussi bien

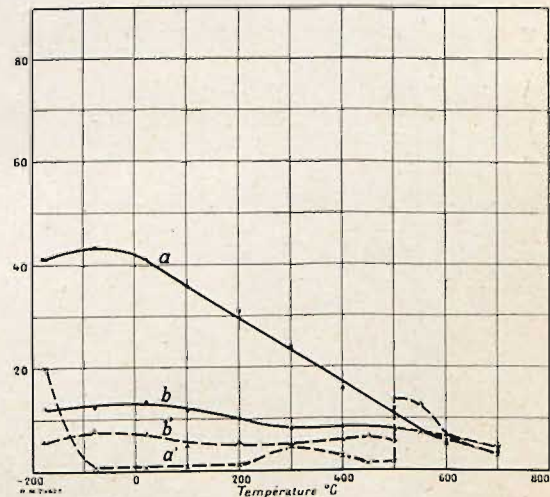


Fig. 3. — a et b, allongement uniforme et allongement de striction pour l'alliage recuit; a' et b', les mêmes paramètres pour l'alliage écroui à 50 %.

pour l'alliage recuit que pour l'alliage écroui. L'allongement uniforme pour l'alliage écroui, assez important à la température de l'air liquide, s'annule

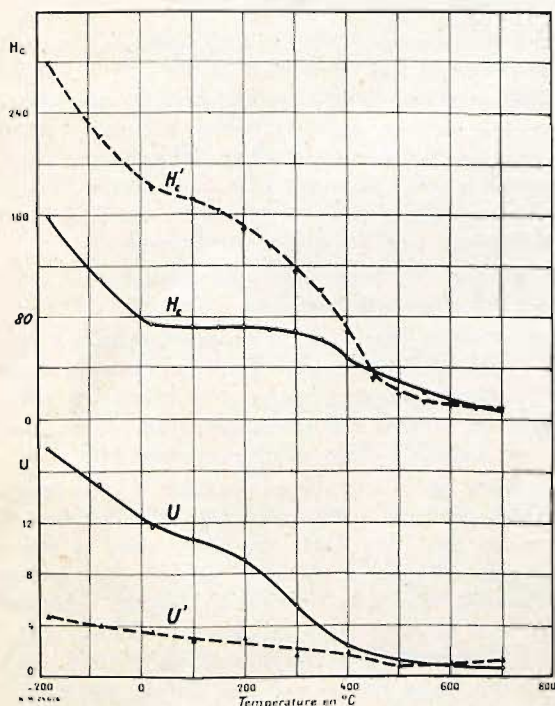


Fig. 4. — H_c et U , dureté et résilience pour l'alliage recuit; H_c' et U' , les mêmes paramètres pour l'alliage écroui à 50 p. 100.

presque vers -80° pour remonter au revenu à 300° et au recuit à 500° .

La dureté et la résilience (fig. 4) paraissent manifester une allure assez analogue à celle de la résistance à la traction (fig. 1). On y voit notamment un ralentissement de leur chute entre la température ordinaire et 250° environ.

Influence de l'érouissage. — L'érouissage Z était mesuré en pour 100 par la réduction de la section de l'échantillon rapportée à la section primitive (S_0), soit :

$$Z = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \cdot 100.$$

Jusqu'à 10 % l'érouissage était obtenu par traction, au delà par laminage et par étirage. L'influence de l'érouissage sur les propriétés mécaniques est indiquée au tableau III et sur la figure 5.

Nous voyons (fig. 5) que pour le bronze étudié on distingue les trois phases d'érouissage qui avaient été mises en évidence pour les laitons et pour le fer (1). La première de ces phases, s'étendant jusqu'à un érouissage de 20 p. 100 environ, est caractérisée par la chute presque complète de l'allongement proportionnel (a) et par des points d'inflexion sur la majeure partie des courbes, en particulier sur celle de la résilience (U). L'influence de l'érouissage sur la variation des propriétés mécaniques est plus modérée pendant la deuxième phase qui s'étend jusqu'à 72 p. 100. Le commen-

(1) Broniewski et Krol. C. R. 1931, CXCI, p. 38.

Tableau III. — Influence de l'érouissage (Z) sur les propriétés mécaniques d'un bronze pour médailles.

| Z % | R kg/mm ² | Q kg/mm ² | A % | a % | b % | max. φ % | min. φ % | H kg/mm ² | U kgm/cm ² | $k = \frac{R}{H}$ | T |
|------|----------------------|----------------------|------|------|------|------------------|------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|------|
| 0 | 33,4 | 12,2 | 55,1 | 41,5 | 13,6 | 84,0 | 82,7 | 54,1 | 11,6 | 0,621 | 15,9 |
| 2,5 | 34,2 | 16,8 | 52,0 | 38,5 | 13,5 | — | — | 63,6 | — | 0,536 | — |
| 5 | 35,5 | 20,3 | 46,6 | 34,1 | 12,5 | 82,5 | 82,5 | 7,77 | — | 0,464 | 14,9 |
| 9,1 | — | — | — | — | — | — | — | — | 8,7 | — | — |
| 10 | 38,5 | 28,7 | 39,5 | 26,5 | 13,0 | 82,0 | 80,5 | 89,7 | — | 0,429 | 14,4 |
| 15 | 40,6 | 38,8 | 20,5 | 9,5 | 11,0 | 79,5 | 79,5 | 100 | — | 0,406 | 8,2 |
| 16 | — | — | — | — | — | — | — | — | 6,3 | — | — |
| 20 | 45,9 | 43,5 | 11,6 | 1,2 | 10,4 | 78,5 | 77,0 | 110 | 6,0 | 0,417 | 6,9 |
| 23 | — | — | — | — | — | — | — | — | 5,7 | — | — |
| 25 | 48,6 | 46,5 | 10,0 | 1,2 | 8,8 | — | — | — | — | — | — |
| 28,7 | — | — | — | — | — | — | — | — | 5,6 | — | — |
| 30 | 51,2 | 40,2 | 10,4 | 1,2 | 9,2 | 77,5 | 75,0 | 119 | — | 0,436 | 5,7 |
| 40 | 60,4 | 58,7 | 8,4 | 1,0 | 7,4 | 75,0 | 71,0 | 126 | — | 0,478 | 4,8 |
| 41,5 | — | — | — | — | — | — | — | — | 4,2 | — | — |
| 50 | 65,4 | 63,5 | 8,6 | 0,7 | 7,9 | 72,0 | 66,5 | 136 | 3,5 | 0,487 | 4,8 |
| 60 | 72,4 | — | 8,6 | 0,6 | 8,0 | 69,5 | 60,5 | 145 | 3,0 | 0,499 | — |
| 65,5 | — | — | — | — | — | — | — | — | 2,6 | — | — |
| 70 | 82,5 | 81,5 | 7,5 | 0,8 | 6,7 | 64,5 | 51,2 | 154 | — | 0,535 | — |
| 80 | 86,0 | 85,0 | 5,3 | 0,6 | 4,7 | 60,5 | 49,5 | 160 | — | 0,536 | — |
| 90 | 89,7 | 88,7 | 2,0 | 0,2 | 1,8 | 49,0 | 19,2 | 166 | — | 0,540 | — |
| 95 | 95,6 | — | 0,9 | — | — | 32,5 | 5,5 | 172 | — | 0,588 | — |
| 97 | 103 | — | — | — | — | 31,5 | 6,0 | 177 | — | 0,581 | — |
| 99 | 107 | — | — | — | — | 6,0 | — | 195 | — | 0,550 | — |
| 99,9 | 111 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

cement de la troisième phase de l'écroissage se fait surtout remarquer par le fléchissement de la striction et par des points d'inflexion sur presque toutes les courbes.

tion sensible déjà à partir d'un écroissage de 10 %, alors que le rapport $R/H=K$ passe par un minimum vers la fin de la première phase de l'écroissage.

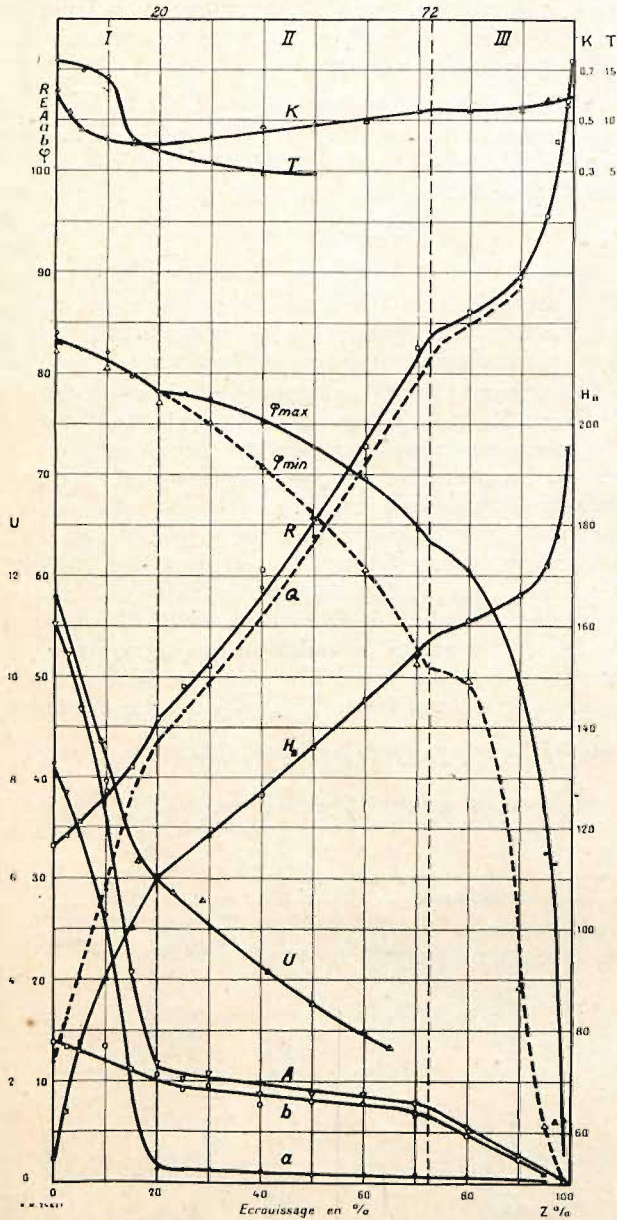


Fig. 5. — Influence de l'écroissage sur les propriétés mécaniques d'un bronze pour médailles.

Comme pour les autres métaux, l'écroissage fait subir ici une augmentation aux paramètres H, R et Q et réduit les valeurs de A, a, b, φ et U. Le travail de rupture à la traction (T) subit une réduction

Effet du revenu après écroissage. — Les alliages écrois à 2,5, 10, 20, 50 et 90 % étaient chauffés au four électrique pendant 30 minutes et pendant 2 heures, puis refroidis à l'eau. Comme terme de comparaison servait un alliage recuit préalablement à 600° pendant une demi-heure. La dureté de ces alliages était mesurée, comme après l'écroissage, par la méthode Brinell.

Le tableau IV, ainsi que les figures 6 et 7 reproduisent les résultats obtenus.

Nous voyons (fig. 6 et 7) qu'un revenu au voisinage de 200° fait apparaître un maximum de dureté pour les écroissages dépassant la première phase. Lorsque le revenu est assez long (fig. 7) ce maximum est précédé d'un minimum vers 100°.

La chute de la dureté commence à une température de revenu d'autant plus basse, que l'écroissage avait été plus fort, de sorte que la dureté de certains alliages, ayant subi un fort écroissage, peut devenir, après un revenu approprié, inférieure à celle des alliages plus faiblement écrois (fig. 6 et 7). La réduction de la dureté au revenu paraît se faire en deux temps, ce qui donne sur les diagrammes des paliers visibles surtout entre 400° et 500°. Un recuit à 600° ne laisse persister que des différences très faibles entre les alliages ayant subi des écroissages différents.

Après écroissage, l'alliage présente au microscope un aspect hétérogène. On y voit des débris de cristaux de grandeur variable, suivant le degré de l'écroissage, sur un fond de métal écroi. Celui-ci paraît être dans un état instable, intermédiaire entre l'état cristallin et l'état amorphe, alors que les débris de cristaux conservent leur caractère cristallin.

La grandeur des débris cristallins est approximativement la suivante :

| Écroissage en %... | 10 | 20 | 50 | 90 |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Grandeur des débris cristallins en mm.. | 0,012 | 0,008 | 0,005 | 0,004 |

La chute de la dureté, précédant le palier de la courbe, paraît correspondre à une recristallisation ultramicroscopique du métal écroi et demeuré à l'état instable. Un recuit très long, de 5 heures environ, fait apparaître au microscope des nouveaux cristaux à peine perceptibles à la température du début de ce palier, alors qu'un recuit voisin d'une heure ne permet de les constater qu'à la

température extrême du palier. Les paliers des diagrammes (fig. 6 et 7) paraissent donc correspondre à l'agglomération des cristaux ultra-microscopiques

paraissent les gros cristaux et leur formation est d'autant plus facile que les débris agglomérés sont plus grands.

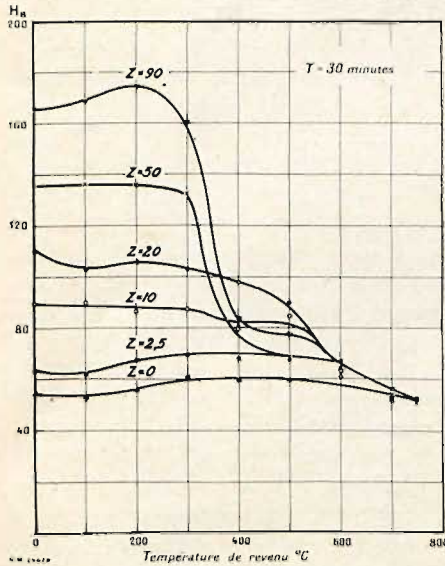


Fig. 6. — Effet d'un revenu de 30 minutes à la température t° sur la dureté du bronze pour médailles écroûti à Z %.

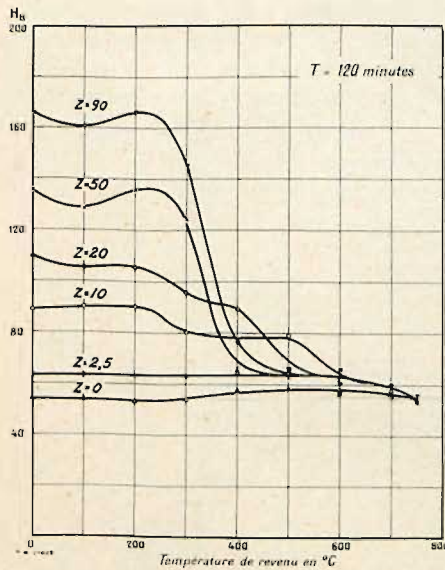


Fig. 7. — Effet d'un revenu de 2 heures à la température t° sur la dureté du bronze pour médailles écroûti à Z %.

dont le dépôt avait été manifesté préalablement par la chute de la dureté.

La rechute de la dureté dont le palier est suivi semble être due à l'agglomération des débris cristallins formés par l'écroûissage. C'est alors qu'ap-

Tableau IV. — Dureté H_B d'un bronze pour médailles en fonction de l'écroûissage Z %, de la température de revenu t et du temps de revenu exprimé en minutes.

| Min. | Z % | t | | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| 30' | 90 | 169 | 175 | 160 | 83 | 78 | 62 | 52 | 51 |
| | 50 | 136 | 136 | 132 | 81 | 68 | 64 | 54 | 52 |
| | 20 | 103 | 106 | 103 | 98 | 90 | 60 | 53 | 51 |
| | 10 | 90 | 86 | 87 | 80 | 84 | 61 | 52 | 53 |
| | 2,5 | 62 | 68 | 69 | 68 | 68 | 67 | 56 | 52 |
| | 0 | 53 | 56 | 61 | 60 | 60 | 63 | 53 | 52 |
| 120' | 90 | 160 | 166 | 145 | 78 | 66 | 61 | 60 | 56 |
| | 50 | 128 | 136 | 125 | 66 | 64 | 62 | 60 | 55 |
| | 20 | 105 | 105 | 96 | 90 | 66 | 58 | 57 | 54 |
| | 10 | 90 | 91 | 80 | 78 | 80 | 57 | 57 | 54 |
| | 2,5 | 64 | 64 | 64 | 65 | 66 | 66 | 56 | 54 |
| | 0 | 54 | 53 | 54 | 57 | 58 | 58 | 56 | 54 |

Dureté H_B

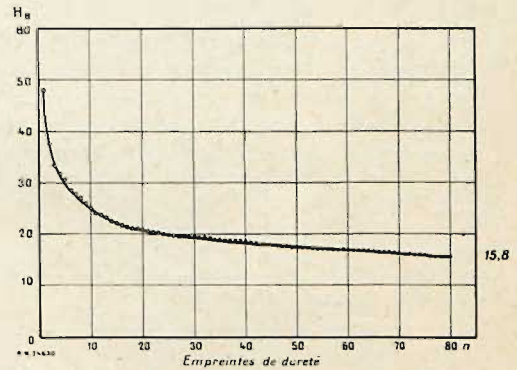


Fig. 8. — Dureté Brinell d'un bronze pour médailles en fonction des empreintes successives n .

Un écroûissage nul est pourtant moins favorable à la formation de gros cristaux qu'un écroûissage faible, les débris cristallins ayant une tendance plus forte à l'agglomération que les cristaux n'ayant pas subi la fracture par l'écroûissage.

Dans le bronze pour médailles, une tendance à la formation de forts cristaux ne se manifeste que pour un recuit supérieur à 700°.

La vraie dureté. — La mesure de la dureté est entachée d'erreur due à ce que le métal s'écroûit sous la bille, de sorte que la pression appliquée est supportée par un corps aux propriétés mécaniques différentes de celui qu'on avait voulu étudier.

Afin de déterminer la vraie dureté de l'alliage, nous avons appliqué la méthode connue des em-

preintes successives, indiquée par M. Hanriot (1). Un échantillon de bronze de 45 mm. de diamètre, recuit 12 heures à 700° subissait une empreinte de dureté Brinell normale par une bille de 10 mm. sous une pression de 500 kgs. L'échantillon était soumis ensuite à des recuits de 30 min. à 600° et à des empreintes successives à l'endroit du premier essai, jusqu'au moment où le chiffre de dureté se stabilisait. La pression de la bille était alors supportée par la réaction élastique du métal recuit dont la vraie dureté était ainsi établie.

Les résultats obtenus sont indiqués sur la figure 8.

Le nombre d'empreintes et de recuits successifs avait été poussé jusqu'à 80 et c'est alors seulement que la stabilisation pouvait être considérée comme atteinte.

La dureté du bronze, qui au début était de 48,8, se stabilisa alors à 15,8. Le rapport de la dureté normalement établie à la vraie dureté ainsi obtenue est donc voisin de 3,1 alors que pour les laitons à 33 et à 40 % de zinc (1) il est 3,7, pour le cuivre (2) il est 2,8 et pour le fer (3) 2,5.

Résumé. — 1. L'influence de la température et de l'érouissage a été étudiée sur un bronze pour médailles à 5 % d'étain et 95 % de cuivre. Ont été mesurés : la résistance à la traction, la limite élastique, la striction, les allongements total, propor-

(1) M. Hanriot, Sur l'érouissage. Revue de Métall. 1913, X, p. 595.

(1) Broniewski et Pelczynski, l. c.

(2) Krupkowski. Revue de Métall., 1932, XXIX, p. 24.

(3) Broniewski et Krol, l. c.

tionnel et de striction, la dureté, la résilience et le travail de rupture à la traction.

2. L'effet de la température fut soumis à l'étude entre 700° et la température de l'air liquide sur des échantillons écrouis et sur des échantillons recuits. L'abaissement de la résistance à la traction, de la dureté et de la résilience se trouve ralenti entre la température ordinaire et 200°. L'allongement et la striction passent par un maximum ; pour les alliages écrouis, ces paramètres montent brusquement à la perte de l'érouissage, vers 500°.

3. On distingue trois phases d'érouissage. La première, qui s'étend jusqu'à 20 %, est caractérisée surtout par la chute presque complète de l'allongement proportionnel. La dernière, qui commence à partir de 72 %, se fait surtout remarquer par le fléchissement de la striction. L'érouissage fait subir une augmentation sensible à la dureté, la résistance à la traction ainsi qu'à la limite élastique et réduit les valeurs des allongements à la rupture, de la striction et de la résilience.

4. Le revenu, après érouissage, fait apparaître un maximum de dureté au voisinage de 200° pour les érouissages dépassant la première phase. La chute de la dureté commence à une température d'autant plus basse, que l'érouissage avait été plus fort et paraît correspondre à la précipitation de cristaux ultra microscopiques dont l'agglomération se fait à une température sensiblement supérieure.

5. Le rapport de la dureté normalement mesurée à la vraie dureté, établie par la méthode des empreintes successives, est pour le bronze étudié, voisin de 3,1.

