

Sur l'écrouissage, le revenu et le recuit des laitons

par MM. W. BRONIEWSKI et T. PELCZYNSKI



PREMIÈRE PARTIE

Historique. — Plus que tout autre alliage, le laiton a servi à l'étude de l'écrouissage.

Les premières notions sur ce sujet sont dues à Réaumur et parurent dans « Art de l'épinglier » (1), édité après sa mort.

« Les trous, dit-il, par où les tireurs font passer le laiton pour le réduire en fil contribuent encore à le rendre plus ferme.

« Les épingliers prennent toujours un fil plus gros que les épingles qu'ils veulent faire; ils se réservent à le faire passer par quelques trous de filière pour le bien écrouir.

« Quand le gros fil a passé par deux trous, on le recuit à un feu de bois. Le chêne est le seul qu'on évite de brûler; sa chaleur est trop vive et le fil en devient plus aisé à rompre. »

Ces notions restreintes sur l'écrouissage résument tout ce qu'on savait à ce sujet jusqu'à la fin du XIX^e siècle.

L'étude scientifique de l'écrouissage ne fut entreprise que par M. Charpy (2) en 1893. Il établit l'influence de la température du recuit sur les propriétés mécaniques du laiton écroui et mit en évidence par la micrographie les changements correspondants de leur structure. M. Charpy avait déjà remarqué pour les laitons que « moins l'écrouissage est prononcé, plus la température à laquelle il faut chauffer le métal pour le modifier est élevée ».

C'est en 1909 que parurent les recherches, devenues classiques, de M. Grard (3) sur l'écrouissage des laitons et du cuivre. Comme mesure de l'écrouissage par laminage ou étirage M. Grard ad-

(1) Réaumur. Art de l'épinglier avec addition de MM. Duhamel et Perronet, Paris, 1761, pages 8 et 11.

(2) Charpy. C. R., CXVI, 1131 (1893); CXVII, 850 (1893).

(3) Grard. Revue de Métall., VI, 1069 (1909).

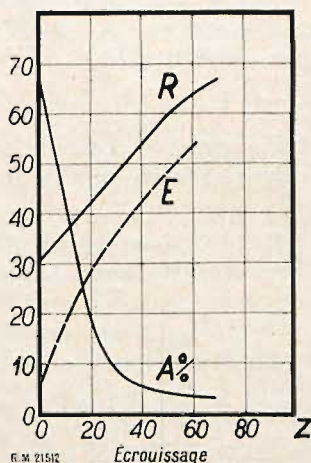


Fig. 1. — Résistance à la traction R, limite élastique E, allongement à la rupture A % en fonction de l'écrouissage Z du laiton à cartouches, suivant M. Grard.

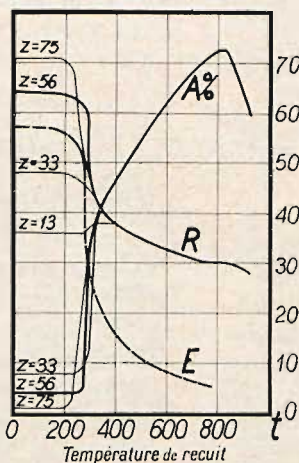


Fig. 2. — Influence de la température du recuit t sur la résistance à la traction R, la limite élastique E et l'allongement à la traction A % pour des laitons à différent degré d'écrouissage Z, suivant M. Grard.

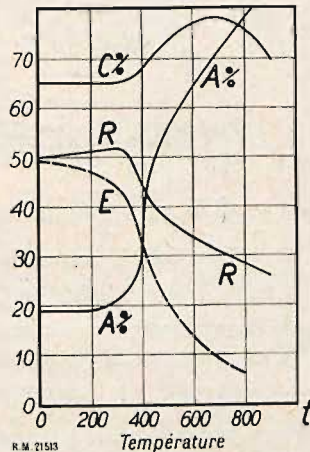


Fig. 3. — Effet d'un recuit de 30 min. sur la résistance à la traction R, la limite élastique E, l'allongement A % et la striction C %, suivant MM. Bengough et Hudson.

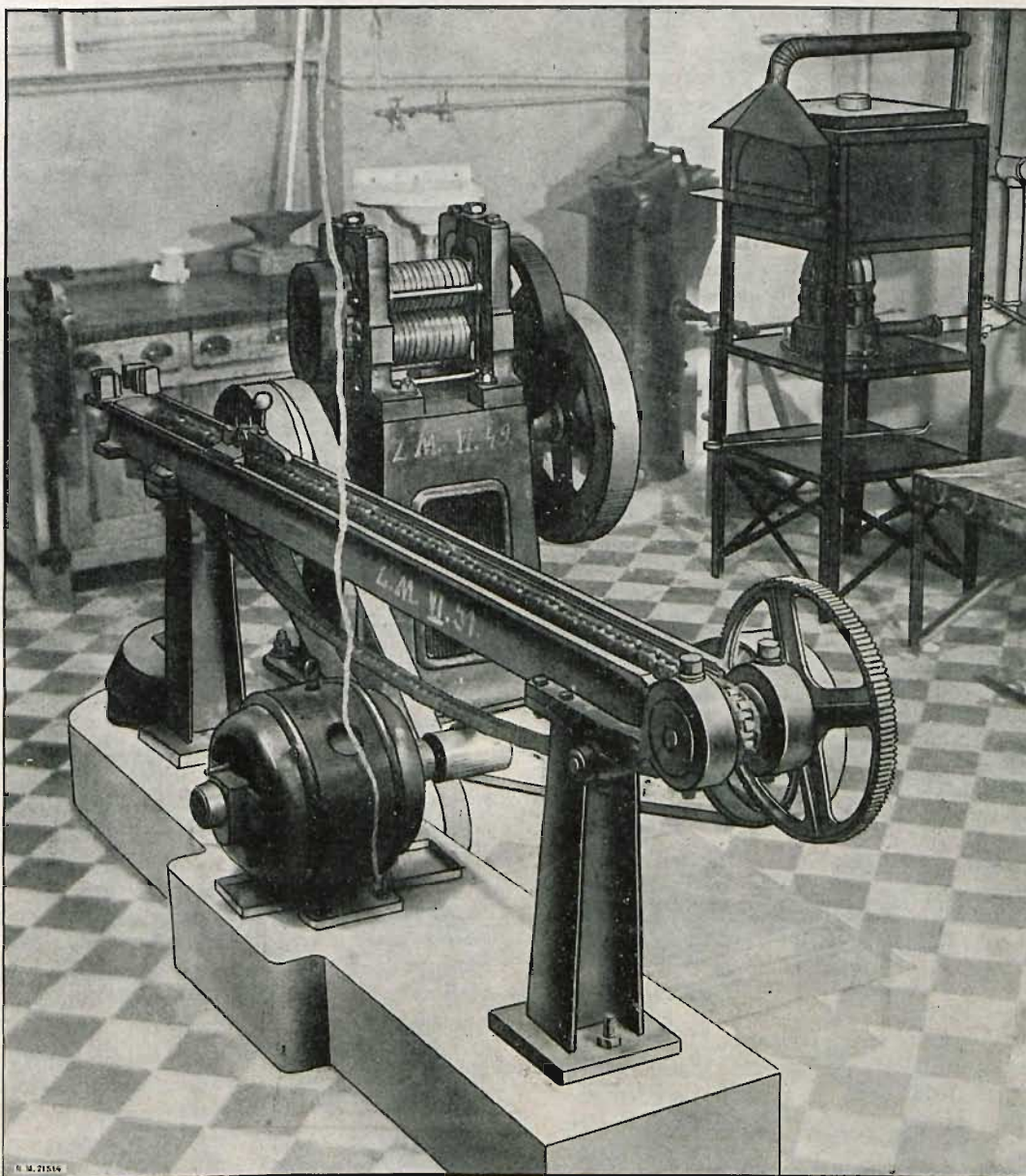


Fig. 4. — Installation pour la préparation des échantillons. De gauche à droite : la machine à étirer, le laminoir et le four à recuire.

met la réduction de la section de l'échantillon rapporté à sa section nouvelle S_1 . Ce mode de représentation n'est pas commode à exprimer graphiquement, étant donné que l'écroissage maximum serait indiqué par un nombre tendant vers l'infini.

Il est bien plus pratique de rapporter la réduction

de la section à la section primitive S_0 . L'écroissage (Z) s'exprime alors en p. 100 par la formule :

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

et ne peut ainsi que se rapprocher de 100.

Les résultats obtenus par M. Grard, pour le laiton à 33 p. 100 de zinc, recalculés pour cette échelle

d'érouissage, sont reproduits dans les figures suivantes.

La figure 1 montre que la résistance à la traction (R) et la limite élastique (E) montent presque proportionnellement à l'érouissage (Z), alors que la courbe de l'allongement (A) manifeste un changement de direction aux environs d'un érouissage de 30 p. 100.

L'influence de la température de recuit sur les propriétés mécaniques des laitons érouis est indiquée par la figure 2.

Nous y voyons que les laitons érouis ne paraissent subir l'influence du recuit qu'au-dessus de 200° et montrent entre 250° et 530° une modification rapide qui a lieu à une température d'autant plus basse que l'érouissage est plus élevé.

L'effet de l'érouissage ne disparaît pas entièrement dans ces conditions et l'influence du recuit se fait sentir jusqu'à 800° environ. Une zone de fléchissement commence au-dessus de cette température.

Pour un recuit à 300°, l'état stable ne se trouve atteint qu'en 20 minutes, alors que vers 400° et à des températures supérieures il suffit de la moitié de ce temps.

M. Grard admet « que les températures de recuit, donnant au laiton à cartouches des propriétés déterminées, sont à peu près indépendantes de l'état d'érouissage initial » et « que la valeur de cet érouissage a une minime influence sur la durée du recuit ».

MM. Bengough et Hudson (1) étudient l'effet du recuit sur les propriétés mécaniques d'un laiton éroui à 30 p. 100 de zinc (fig. 3). Ils trouvent qu'un revenu à 300° peut augmenter la résistance à la traction R, ce qui n'avait pas été indiqué dans les travaux précédents.

M. Webster (2) indique la résistance à la traction, l'allongement et la striction en fonction de l'érouissage pour trois laitons, dont un à cartouches. M. Ellis (3) mesure la dureté et les paramètres de traction d'un laiton à 39 p. 100 de zinc.

M. Portevin (4) étudie la dureté des laitons à 10 et à 33 p. 100 de zinc en fonction de l'érouissage, alors que MM. Bassett et Davis (5) font la comparaison de la dureté et de la dimension des grains pour un laiton à cartouches recuit, après érouissage, entre 200° et 850°.

M. Masing (6) étudie les tensions internes des laitons érouis et indique le traitement thermique permettant d'éviter la formation de criques.

M. Nicolau (7) préconise l'emploi d'empreintes microscopiques de dureté (méthode Le Grix) pour l'étude de l'érouissage et du revenu des laitons.

M. Eugène (8) applique cette méthode aux laitons à 10, 28, 33 et 40 p. 100 de zinc érouis jusqu'à 74 p. 100 et recuits ensuite jusqu'à 600°.

MM. Dawidenkow et Bugakow (9) étudient l'influence de l'érouissage sur la dureté et les paramètres de traction d'un laiton à cartouches.

Malgré le nombre considérable de travaux sur l'érouissage et le recuit des laitons, nos connaissances à ce sujet ne peuvent pas passer pour suffisantes. Le maximum, atteint par l'érouissage, ne dépassa guère 75 p. 100 alors que le domaine non atteint paraît le plus intéressant, sous certains rapports. Même, dans les limites étudiées, quelques paramètres mécaniques, comme la résilience et l'allongement proportionnel n'avaient pas été mesurés.

Nous avons donc cru utile de reprendre cette étude, sous une forme plus complète, en l'appliquant aux laitons industriels à 33 et à 40 p. 100 de zinc.

Préparation des échantillons. — Dans nos essais était employé le laiton industriel, préparé avec des métaux électrolytiques et pratiquement dépourvu d'impuretés. Ce matériel nous était livré sous forme de barres d'une section voisine de 250 mm² et à érouissage de 20 p. 100 environ.

Successivement, par laminage et par étirage, ces barres étaient transformées en échantillons rectangulaires de 8 × 10 mm. de section, pour l'essai de résilience, ou en fils de 5 mm. de diamètre pour l'essai de traction et de dureté. On commençait par ramener l'échantillon à une section calculée d'avance, à partir de laquelle pouvait être atteint l'érouissage cherché. Cette section était obtenue par des passes successives d'érouissage de 25 p. 100 en somme et de recuit. Puis, avant l'érouissage final, l'échantillon subissait un recuit de 2 heures à 550° au four électrique.

L'érouissage, très faible, inférieur à 10 p. 100, était produit par traction ce qui, suivant M. Guillet (10), donne le même effet que l'étirage.

(6) Masing. Zs. f. Metallk., XVI, 257 et 301 (1924).

(7) Nicolau, Revue de Métall., XXV, 155 (1928).

(8) Eugène. Revue de Métall., XXV, 685 (1928); XXVI, 29 (1929).

(9) Dawidenkow et Bugakow, Metallwirtschaft, X, 1 (1931); J. Inst. Met. (Abstr.), XLVII, 201 (1932).

(10) L. Guillet. Revue de Métall., XX, 65 (1923).

(1) Bengough et Hudson. J. Inst. of Met., IV, 92 (1910).

(2) Webster. R. de Métall., X, 106 (1913).

(3) Ellis. J. Inst. of Met., XXI, 319 (1919).

(4) Portevin. Revue de Métall., XVI, 235 (1919).

(5) Bassett et Davis. Amer. Inst. of Mining. Ing. (1919), p. 158; Revue de Métall., extraits, XVII, 224 (1929).

La figure 4 nous montre l'installation ayant servi à la préparation des échantillons.

Mesures. — Les échantillons étaient soumis aux essais de traction sur une machine Amsler de 10 tonnes, aux essais de dureté par empreintes microscopiques et à l'essai de choc effectué au mouton Charpy, système Amsler.

Le mode de mesure était le même que dans les autres travaux effectués au laboratoire de métallurgie, à l'Ecole Polytechnique de Varsovie (1).

Les paramètres suivants furent ainsi établis :

R, résistance à la traction en kg. par mm²;

E, limite élastique, mesurée sur le diagramme de traction et censée être égale à la limite de proportionnalité;

A, allongement total à la traction en p. 100 sur

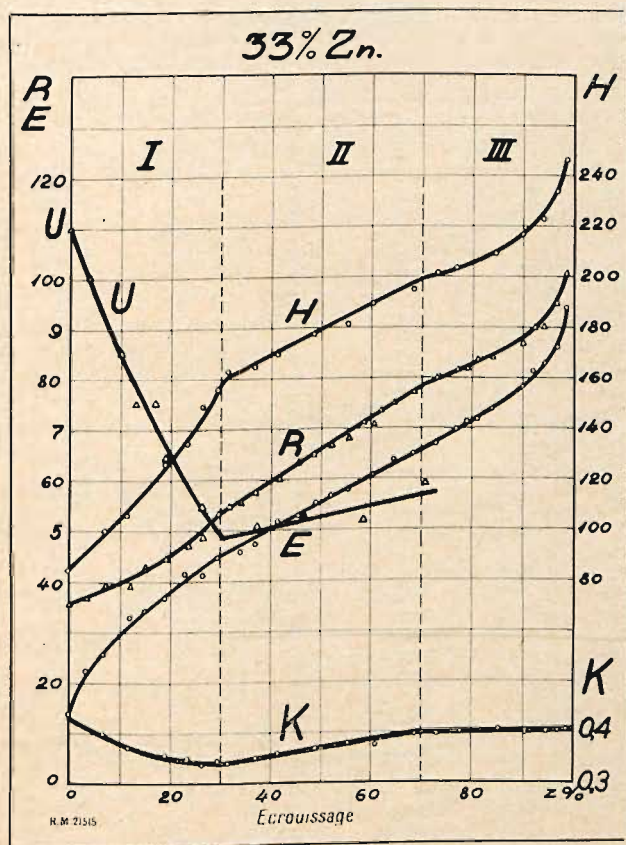


Fig. 5. — Effet de l'écroutissage Z d'un laiton à 33 p. 100 de zinc sur la résistance à la traction R, la limite élastique E, la dureté H, la résilience U et le coefficient $K = \frac{R}{H}$

(1) Revue de Métallurgie, XXVIII, 529, 598, 641 (1931); XXIX, 16, 74 (1932); XXIX, 542, 601 (1932); XXX, 396 (1933).

éprouvette internationale dont la longueur entre repères est égale à 10 diamètres (2) ;

a, allongement proportionnel en p. 100, établi par la mesure de la diminution du diamètre de l'éprouvette aux repères après l'essai de traction;

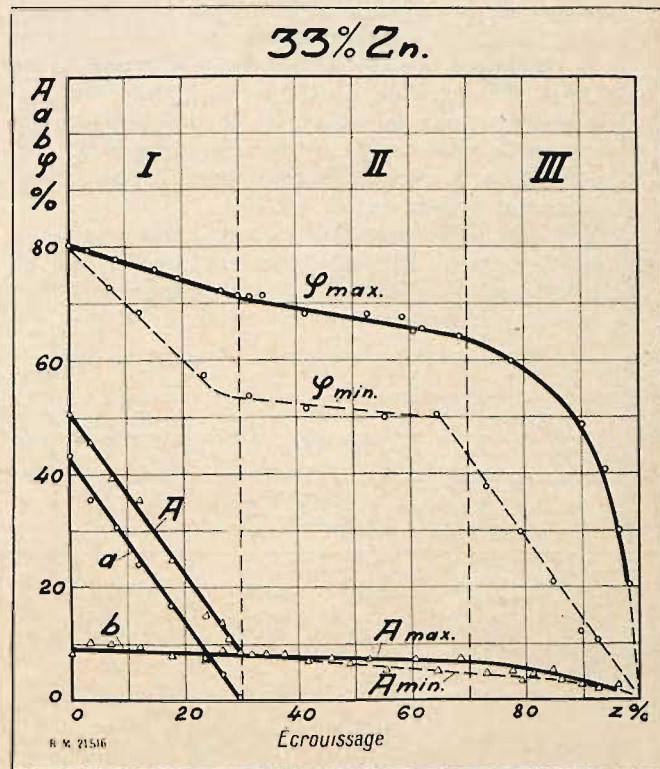


Fig. 6. — Effet de l'écroutissage d'un laiton à 33 p. 100 de zinc sur la striction ϕ , l'allongement total A, l'allongement proportionnel a et l'allongement de striction b.

b, allongement de striction en p. 100 établi, par différence : $b = A - a$;

ϕ , striction en p. 100;

H, dureté Brinell, par empreinte d'une bille de 1 mm. sous le poids de 12 kg.;

U, résilience en kgm. par cm² sur éprouvette allemande de 8 × 10 mm. de section avec entaille de 3 mm. sous l'angle de 45°, qui, pour les laitons, avait donné le plus de garanties de rupture (3).

Les nombres indiqués aux tableaux sont la moyenne de deux essais.

Effet de l'écroutissage. — Pour les laitons à 33 p. 100 de zinc, l'effet de l'écroutissage sur les

(2) L'allongement de l'éprouvette française (A') peut être calculé, avec une précision satisfaisante, par la relation :

$$A' = a + \frac{10}{7,23} b$$

(3) Broniewski et Wesolowski. Revue de Métall., XXX, 398 (1933).

propriétés mécaniques est indiqué au tableau I et reproduit sur les figures 5 et 6.

Sur les figures 5 et 6 nous pouvons distinguer nettement les trois phases de l'écroutissage qui furent déjà mises en évidence pour le fer (1). La première de ces phases est caractérisée surtout par la chute de l'allongement proportionnel a , ainsi que de la résilience U et s'étend jusqu'à un écroutissage de 30 p. 100 environ. La dernière, manifestée particulièrement par la chute de la striction et par une montée plus rapide de la résistance à la traction R et de la dureté H , commence à partir d'un écroutissage voisin de 70 p. 100.

Au delà de la première phase, l'allongement à la rupture ne se fait que par striction, ce qui se manifeste sur la courbe A par un coude accentué se faisant remarquer dans toutes les recherches sur

(1) W. Broniewski et J. Krol. C. R., CXCIH, 38 (1931).

Tableau I. — Propriétés mécaniques du laiton à 33 % de zinc en fonction de l'écroutissage. Z, écroutissage; R, résistance à la traction; E, limite élastique; A max et A min, allongement total maximum et minimum; a, allongement proportionnel; b, allongement de striction; φ max et φ min, striction maxima et minima; H, dureté Brinell; U, résilience; coefficient $K = R/H$.

Z %	R kg/mm ²	E kg/mm ²	A _{max} %	A _{min} %	a %	b %	φ _{max} %	φ _{min} %	H kg/mm ²	U kgm/cm ²	$K = \frac{R}{H}$
0	36,3	14,2	51,0	—	43,0	8,0	80,0	—	85	11,06	0,428
3,5	37,5	23,2	45,5	—	35	10,5	79,0	—	—	—	—
4,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10,10	—
7,0	40,2	25,8	39,0	—	29,0	10,0	—	72,5	101	—	0,398
8,1	40,2	—	—	—	30,6	—	77,5	—	—	—	—
10,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,45	—
12,0	39,5	33,0	33,5	—	24,0	9,5	—	67,5	107	—	0,369
13,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7,45	—
15,0	43,9	35,0	—	—	—	—	75,5	—	—	—	—
17,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7,50	—
17,6	42,5	—	24,5	—	16,8	7,7	73,0	—	—	—	—
19,0	45,0	37,0	—	—	—	—	74,1	—	127	—	0,354
23,5	47,3	42,0	14,5	—	7,0	7,5	77,1	57,1	135	—	0,351
26,5	49,7	41,5	13,5	—	4,0	9,5	72,1	—	148	5,40	0,336
20,5	54,1	45,0	8,3	—	0,2	8,1	71,0	—	158	—	0,396
31,5	55,3	45,0	8,0	—	0,3	7,7	71,0	53,3	164	—	0,337
34,0	55,8	46,3	8,2	—	—	—	71,0	—	—	4,65	—
37,0	57,5	48,0	8,0	—	—	—	65,6	—	165	5,10	0,348
41,4	60,6	51,4	6,7	—	—	—	67,0	51,0	170	—	0,356
45,2	63,9	53,0	7,2	—	—	—	70,6	—	—	5,25	—
48,7	65,6	53,4	6,4	—	—	—	—	60,0	178	5,20	0,368
52,2	67,4	56,7	7,0	—	—	—	68,9	—	—	—	—
55,2	68,4	58,0	5,0	4,8	—	—	—	49,5	181	—	0,378
58,3	72,0	61,0	7,3	—	—	—	67,4	—	—	5,25	—
60,6	71,0	—	—	5,0	—	—	64,2	—	189	—	0,376
61,8	74,0	—	—	—	—	—	65,0	—	—	—	—
64,3	75,3	63,5	—	5,0	—	—	—	48,7	—	—	—
68,4	77,5	65,0	7,3	—	—	—	64,2	—	195	—	0,396
70,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,80	—
72,8	80,2	67,0	—	4,5	—	—	—	37,2	202	—	0,397
77,3	82,0	70,0	5,0	—	—	—	50,5	—	204	—	0,402
78,9	81,8	71,0	—	3,0	—	—	46,0	29,5	—	—	—
81,0	84,0	—	4,8	4,3	—	—	—	33,0	—	—	—
84,0	84,6	—	—	—	—	—	—	20,5	—	—	—
84,7	85,6	74,2	5,0	—	—	—	—	20,5	210	—	0,408
86,0	—	—	—	3,7	—	—	—	25,0	—	—	—
89,6	85,6	—	—	2,7	—	—	—	11,6	—	—	—
90,0	87,7	78,4	3,0	—	—	—	48,4	32,0	218	—	0,403
92,3	90,5	81,5	—	2,1	—	—	—	10,5	—	—	—
94,0	90,0	83,0	—	—	—	—	40,5	18,0	223	—	0,403
96,7	95,0	86,0	3,5	—	—	—	30,0	—	235	—	0,405
98,3	101,0	93,7	2,2	—	—	—	20,0	—	247	—	0,410

l'écroutissage, sans que sa cause soit jamais indiquée.

La fin de la première phase de l'écroutissage est aussi manifestée par des coudes sur les courbes (H, R, E, φ) et par un minimum du coefficient

$$K = \frac{R}{H},$$

de sorte que l'alliage écrouti à ce degré

possède la plus grande dureté par rapport à sa résistance à la traction.

La fin de la première phase de l'écroutissage peut aussi, pour ce laiton, être très exactement calculée par la formule de M. Krupkowski (2) :

$$\bar{\tau} = 100 \frac{a}{a+100} = 100 \frac{43}{43+100} = 30 \%$$

Moins nettement est marquée la fin de la deuxième phase d'écroutissage. La chute de la stric-

(2) Krupkowski. Revue de Métall., XXVIII, 540 (1931), formule N 37.

tion, qui est son indice le plus important, apparaît sensiblement influencée par le mode de rupture de l'éprouvette, celle-ci montrant soit une cassure conique, produite par une striction normale, soit une cassure en biseau, qui avait déjà été remarquée pour les aciers par M. Leblond (1).

La striction est, de ce fait, fortement influencée, en prenant soit des valeurs maxima pour la cassure conique (φ max.), soit des valeurs minima pour la cassure en biseau (φ min.). Le plus souvent on rencontre des cassures intermédiaires où s'amorce une striction conique pour finir par une rupture en biseau. Ces cassures intermédiaires donnent aussi pour la striction des nombres intermédiaires entre les valeurs maxima et minima.

La cassure en cône ou en biseau influence, de même, quelque peu l'allongement (A max. et A min.), mais ne se fait presque pas sentir pour les autres paramètres de traction.

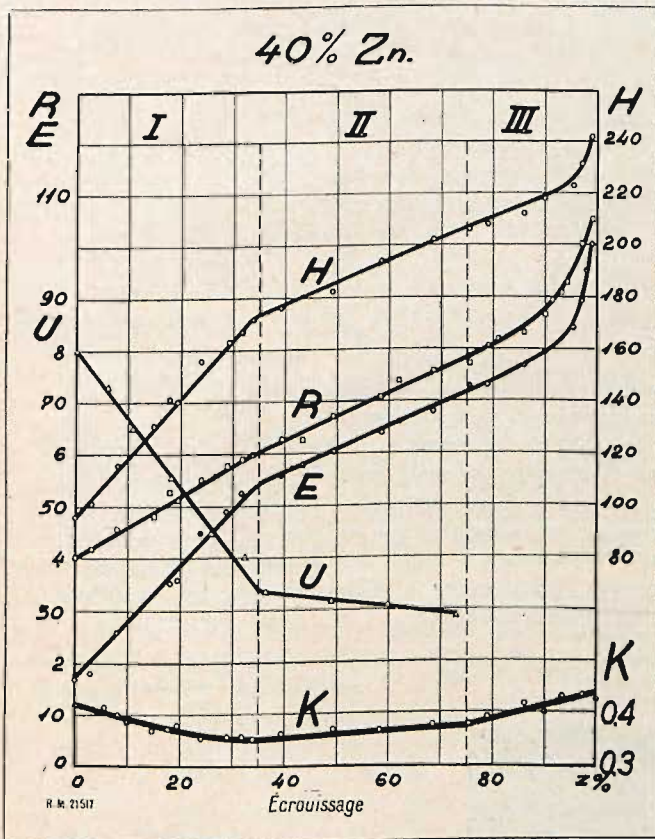


Fig. 7. — Effet de l'écroissage Z d'un laiton à 40 p. 100 de zinc sur la résistance à la traction R, la limite élastique E, la dureté H, la résilience U et le coefficient

$$K = \frac{R}{H}$$

(1) Leblond. Revue de Métall., XX, 250 (1923).

Les chiffres concernant l'écroissage des laiton à 40 p. 100 de zinc sont indiqués dans le tableau II et reproduits sur les diagrammes des figures 7 et 8. Pour ces laiton, comme pour les laiton à car-

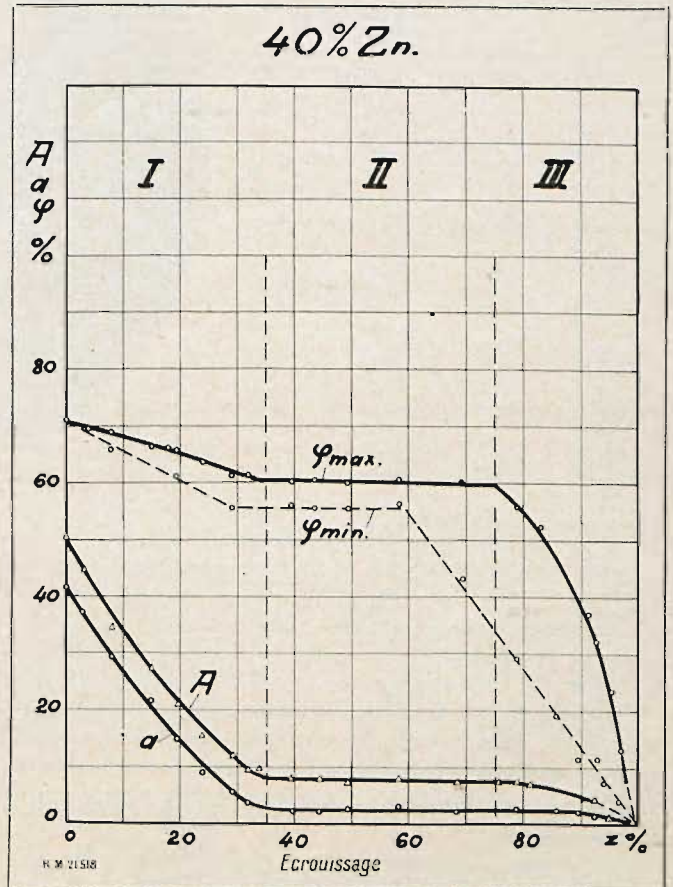


Fig. 8. — Effet de l'écroissage Z d'un laiton à 40 p. 100 de zinc sur la striction φ , l'allongement total A, l'allongement proportionnel a.

touches, trois phases d'écroissage sont mises en évidence.

La fin de la première qui paraît, pour ce laiton, être voisine de 35 p. 100 d'écroissage, est surtout marquée par un coude dans la courbe de la résilience U, alors que l'allongement proportionnel a ne disparaît pas complètement, ce qui manifeste un écroissage insuffisamment uniforme qui laisse persister une proportion appréciable de métal à faible écroissage, ne dépassant pas la première phase.

Le calcul, par la formule de M. Krupkowski de la fin de la première phase donne un nombre trop faible, ce qui est probablement dû à une température de recuit préliminaire trop basse (550°), insuffi-

REVUE DE METALLURGIE

Tableau II. — Propriétés mécaniques du laiton à 40 % de zinc en fonction de l'écroutissage. Z, écroutissage; R, résistance à la traction; E, limite élastique; A max et A min, allongement total maximum et minimum; a, allongement proportionnel; b, allongement de striction; φ max et φ min, striction maxima et minima; H, dureté Brinell; U, résilience; coefficient K = R/H.

Z %	R kg/mm ²	E kg/mm ²	A _{max} %	A _{min} %	a %	b %	φ _{max} %	φ _{min} %	H kg/mm ²	U kgm/cm ²	K = R/H
0	40,2	17,0	51,5	—	42,0	9,5	71,0	—	96	8,0	0,419
3,0	41,5	18,0	45,0	—	37,2	7,8	69,0	—	101	—	0,412
6,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7,35	—
8,0	46,3	26,0	34,2	—	29,0	5,2	68,9	65,5	116	—	0,399
10,0	45,0	—	—	—	—	—	—	—	118	—	0,382
11,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6,5	—
15,0	48,0	—	27,2	—	21,5	6,0	66,0	—	131	—	0,366
18,0	53,0	35,4	—	—	—	—	65,8	—	141	5,6	0,376
19,3	51,6	36,0	20,3	—	14,2	6,1	65,7	61,0	140	—	0,368
24,2	55,0	45,0	16,0	—	8,0	8,0	63,5	—	156	—	0,352
26,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4,48	—
29,3	58,0	49,0	11,5	—	5,3	6,2	61,4	55,5	163	—	0,356
32,0	59,3	52,5	9,8	—	3,5	6,5	61,5	—	167	4,0	0,355
34,0	60,0	—	7,7	—	—	—	—	57,0	172	—	0,349
36,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,3	—
39,5	63,0	56,0	8,7	—	2,3	6,4	60,0	56,0	176	—	0,360
43,5	62,6	58,0	5,7	—	1,5	4,2	40,4	55,0	—	—	—
49,4	67,0	60,5	7,5	—	2,7	4,8	60,0	55,0	182	3,2	0,368
58,4	71,0	64,0	8,4	—	3,5	4,9	60,5	56,5	194	—	0,365
60,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,1	—
62,0	74,5	66,0	—	6,6	1,7	4,9	—	—	—	—	—
68,4	76,0	68,0	7,2	—	2,3	4,9	60,4	43,5	202	—	0,375
73,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,9	—
75,6	77,0	73,0	7,7	—	2,7	5,0	—	—	205	—	0,375
79,0	80,6	73,0	7,7	—	2,5	3,7	56,0	29,0	208	—	0,388
81,0	82,0	—	6,8	—	2,0	4,8	—	—	—	—	—
86,0	88,0	77,0	6,5	—	2,2	4,3	25,3	—	212	—	0,415
90,0	86,5	79,5	—	1,3	—	1,3	—	11,2	218	—	—
91,5	89,5	—	2,5	—	—	—	37,0	10,0	—	—	—
93,0	91,0	82,1	3,2	—	—	—	32,0	11,4	212	—	0,429
93,5	91,0	—	—	—	0,8	4,2	32,8	7,2	—	—	—
94,2	92,7	—	—	—	—	—	—	7,2	—	—	—
95,5	—	84,0	—	—	—	—	23,6	—	223	—	—
97,0	101,0	89,5	2,0	—	—	—	13,0	4,3	232	—	0,434
98,0	100,5	95,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
99,0	105,0	100,0	—	—	—	—	—	—	242	—	0,425

sante pour détruire complètement l'effet de l'écroutissage.

Le commencement de la troisième phase, voisin de 75 p. 100, est marqué surtout par la chute de la striction φ qui montre, comme pour les laitons à cartouches des valeurs maxima et minima, suivant que la cassure se fait en cône ou en biseau.

D'une façon générale, on peut remarquer que l'écroutissage des métaux influence surtout leur allongement proportionnel et la striction. Dans les laitons, ces paramètres sont aussi fortement influen-

cés par la pureté de l'alliage et particulièrement par son oxydation à la fusion (1).

Les laitons, obtenus au laboratoire par fusion au four électrique à haute fréquence dans un creuset de graphite, pour empêcher toute oxydation, manifestent un allongement et une striction sensiblement supérieurs à celle des alliages techniques et auraient pu donner à l'écroutissage des résultats quelque peu différents. (A suivre.)

(1) Broniewski et Lewandowski. Revue de Fonderie Moderne, XXVII, 176 (1933). La désoxydation des laitons.

