

WITOLD BRONIEWSKI

BIBLIOTEKA
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
Warszawa, Pl. Janusza Robotniczej 1

B-3657

SUR L'ALLONGEMENT DE STRICTION ET LE TRAVAIL DE RUPTURE
A LA TRACTION

ALLONGEMENT DE STRICTION. Depuis l'invention des éprouvettes de traction par MUSCHENBROEK⁽¹⁾, on sait que l'allongement à la rupture se compose de deux allongements distincts dont un se répartit à peu près uniformément sur toute la longueur de l'éprouvette, tandis que l'autre se trouve localisé à l'endroit de la striction.

M.CHARPY⁽²⁾ indique le moyen de séparer l'allongement de striction de l'allongement uniforme qu'il appelle proportionnel:

"En mesurant la section moyenne après rupture, on peut évaluer la grandeur de l'allongement proportionnel et calculer, par différence, la valeur de l'allongement de striction."

Pourtant M.CHARPY n'applique pas, dans son étude, la séparation des deux allongements, en ne faisant connaître que l'allongement total.

N'ayant pas trouvé dans la littérature qui nous était accessible, de nombres concernant la séparation de l'allongement à la rupture en uniforme et de striction, nous nous sommes occupés à les établir d'une façon régulière dans les recherches effectuées au Laboratoire de Métallurgie à l'Ecole Polytechnique de Varsovie.

L'allongement à la traction était déterminé par les trois paramètres: $A\%$, $a\%$ et $b\%$.

$A\%$ - allongement total à la rupture, mesuré sur éprouvette internationale⁽³⁾ où la distance entre repères est égale à 10 fois le diamètre.

$a\%$ - allongement uniforme, est calculé, en exprimant que le volume du cylindre entre les repères de l'éprouvette n'est pas modifié par cet allongement, alors:

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

où d_0 est le diamètre de l'éprouvette avant l'essai et d_1 , après rupture, au voisinage des repères.

$b\%$ - allongement de striction, établi par la différence:

$$b\% = A\% - a\% \quad (2)$$

1. MUSCHENBROEK, *Physicae experimentales et geometriae dissertationes Lugduni Batavorum*, 1729 p.421, mémoire: Introductio ad cohaerentiam corporum firmorum.

2. G.CHARPY, *Recherches sur les alliages de cuivre et de zinc. Contribution à l'étude des alliages*, Paris 1901, p.1.

3. Assoc. Internat. pour l'essai des matériaux. Congrès de Bruxelles, 1906.

L'allongement uniforme peut être mesuré sur n'importe quelle éprouvette, en donnant des nombres identiques, aux erreurs d'expérience près. Donc, si la mesure de l'allongement total à la rupture donne des nombres différents pour des éprouvettes non similaires, ceci est dû à l'allongement de striction qui dépend du rapport entre le diamètre et la longueur entre repères de l'éprouvette.

Ainsi, lorsqu'on trace sur une éprouvette

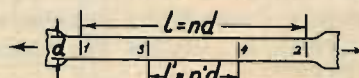


FIG. 1

de diamètre d (Fig.1) des repères à une distance $l = nd$ et $l' = n'd$, l'allongement de l'éprouvette, dû à la striction, Δl donnera pour l'allongement de striction des nombres différents b et b' suivant qu'on rapporte Δl à la longueur l ou l' .

On aura donc

$$b\% = \frac{100 \Delta l}{nd} \quad \text{et} \quad b'\% = \frac{100 \Delta l}{n'd} \quad (3)$$

de sorte que, lorsque la mesure de l'allongement de striction a été faite pour l'éprouvette à repères $l = nd$, sa valeur pour l'éprouvette à repères $l' = n'd$ sera inversement proportionnelle à cette distance:

$$b'\% = b\% \frac{n}{n'} \quad (4)$$

Comme l'allongement uniforme $a\%$ est dans les deux cas le même, les allongements totaux $A\%$ et $A'\%$ seront exprimés par les formules:

$$A\% = a\% + b\%$$

$$A'\% = a\% + b\% \frac{n}{n'} = A\% + b\% \left(\frac{n}{n'} - 1 \right) \quad (5)$$

Les mêmes résultats, aux erreurs d'expérience près seront obtenus pour deux éprouvettes distinctes, aux dimensions $l = nd$ et $l' = n'd$, de sorte qu'en connaissant les valeurs de $A\%$ et de $b\%$, pour une forme déterminée d'éprouvette, on peut calculer les allongements pour toute autre forme.

L'application de ce calcul est satisfaisante, tant que les repères ne sont pas placés trop près ni du congé, réunissant le corps à la tête de l'éprouvette, ni du domaine de la striction. Ainsi, un essai de traction fait sur l'éprouvette représentée sur la fig.1 pourrait donner pour le diamètre d , après rupture, des

1955-202.

valeurs inégales aux endroits de mesure, trop fortes aux repères 1 et 2, à cause de la proximité des congés et trop faibles aux repères 3 et 4, rapprochées du domaine de la striction. Les nombres déduits pour l'allongement de striction seraient ainsi trop forts pour l'éprouvette longue $l = nd$ et trop faibles pour l'éprouvette courte $l' = n'd$. Les valeurs pour b et b' n'apparaîtraient donc pas inversement proportionnelles aux longueurs l et l' , comme le présume la théorie (formule 4), mais donneraient l'apparence d'une variation plus faible, constatée par certains auteurs, BACH, GORDON, SACHS, et même exprimée par des formules empiriques (4).

Comme exemple de confrontation des résultats expérimentaux avec le calcul, on peut prendre les nombres obtenus dans les essais classiques de BARBA (5) pour un acier doux à 37 kg/mm². En adoptant (6) pour cet acier $b = 8\%$, on obtient pour les dimensions extrêmes des éprouvettes soumises à l'étude les nombres suivants:

diamètre d mm	distance entre repères l mm	$\frac{l}{d}$	A%trouvé	A%cal- culé
10	100	n=10	30,2	30,2
17	50	n'=2,94	50,8	49,4
17	500	n'=29,4	24,8	24,9

L'accord du calcul avec l'expérience apparaît donc satisfaisant.

On trouve aussi, par la formule 5, que l'éprouvette internationale ($n = 10$) donne un allongement total inférieur de 0,4 b% à l'éprouvette française ($n=7,23$), de b% à l'éprouvette courte allemande ($n = 5$) et de 1,5 b% à l'éprouvette courte anglaise ($n = 4$). Cette différence d'allongements peut servir à établir ou à contrôler la valeur de b%.

TRAVAIL DE RUPTURE A LA TRACTION. Le travail de rupture d'une éprouvette peut être calculé en établissant par planimétrie que la surface de son diagramme de traction est égale à N cm². Notamment, lorsqu'on sait que sur l'un des axes $lcm = p$ tonnes d'effort et sur l'autre $lcm = qmm$ d'allongement, le travail de rupture à la traction $F = Npq$ kilogrammètres.

Comme, d'autre part, le travail de rupture

est proportionnel à la section S de l'éprouvette et à la distance l entre ses repères, donc, autrement dit, au volume actif de l'éprouvette, on trouve

$$F = Sl \cdot 10^{-3} \cdot T = VT, \text{ soit } T = \frac{Npq}{V} \quad (6)$$

où V est le volume en cm³, entre les repères de l'éprouvette et T le travail de rupture d'une éprouvette à $V = 1$.

Pour déterminer la valeur de T par la formule (6) il faut disposer du diagramme de traction de l'éprouvette et connaître ses dimensions. Ordinairement on ne connaît de l'alliage que ses paramètres mécaniques, comme la résistance à la traction, R kg/mm², la limite élastique, Q kg/mm² et l'allongement à la rupture $A\%$.

La valeur de T peut alors être calculée en partant d'une surface du diagramme de traction reconstruite sur la base des paramètres de traction du métal. Afin d'opérer cette reconstruction il a fallu établir la forme géométrique des courbes du diagramme de traction (7) et on a pu constater qu'elles s'adaptent le mieux aux tranches d'ellipse.

En partant de cette constatation, il est commode de calculer le travail de rupture d'une éprouvette à forme de fil de lmm de section et de $100mm$ de longueur, dont le volume actif est de $0,1cm^3$ et dont le travail de rupture à la traction, égal à $0,1T$, sera indiqué en grammètres lorsque les nombres de R et de Q sont exprimés en kg/mm² et les nombres de A, a et b indiquent les allongements en pour 100 de l'éprouvette internationale.

La surface totale du diagramme, égale à la somme des trois surfaces (fig.2) ABDEA + BCHB

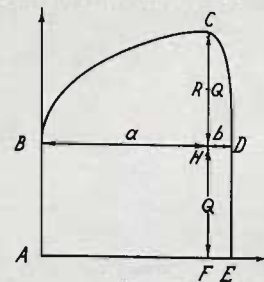


Fig. 2

+ HCDH, peut s'exprimer par la formule:

$$0,1T = (a+b)Q + \frac{\pi a}{4}(R-Q) + \frac{\pi b}{4}(R-Q) = QA + \frac{\pi}{4}(R-Q)A \quad (7)$$

Dans ce calcul, nous avons admis que le point B était situé sur l'axe des efforts, bien qu'un allongement non permanent se fait déjà remarquer à la limite élastique. La surface calculée se trouve, de ce fait, quelque peu supérieure à celle qu'on obtient par planimétrie. On contrebalance approximativement cette différence en remplaçant dans la formule établie le

4. M. KRUPKOWSKI. Rev. de Métall. 29. 1932. p.533 form.15, introduit dans sa formule, concernant le rapport entre l'allongement et la forme de l'éprouvette, non pas l'allongement de striction, mais la striction. Cette formule, appuyée par la théorie, s'accorde bien avec l'expérience.
 5. BARBA, Mem. Soc. Ing. civ. 1880 vol I, p 683; Commission des méthodes d'essais des matériaux de construction, vol 3. p.5.
 6. BRONIEWSKI, PRZEDPELSKI et SULOWSKI, C.R. Acad. Sc. Paris, 204. 1937. p.1874

7. BRONIEWSKI et LEWANDOWSKI, Revue de Fondrie Moderne, 27. 1933. p.175.

nombre π par le chiffre 3:

$$T = \frac{3R+Q}{4} A \cdot 10^{-2} \quad (8)$$

Pour les alliages qui manifestent une proportionnalité approximative entre la résistance à la traction et la limite élastique, la formule se simplifie encore en $T = AR \cdot \text{const.}$ Par exemple, pour les aciers au carbone recuits on trouve, en première approximation: $T = 0,92 RA$.

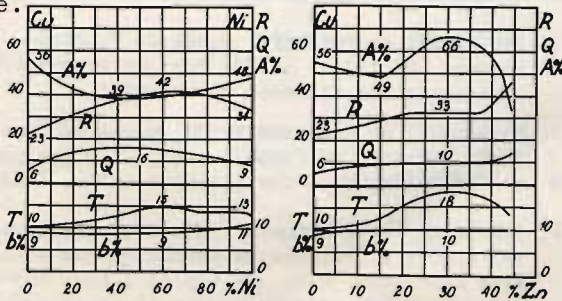
Les formules exprimant le travail de rupture à la traction ont été vérifiées par comparaison avec les diagrammes de traction planimétrés de certains alliages industriels, notamment les laitons, les bronzes, les alliages cuivre-nickel, les aciers doux, demi-durs et durs recuits.

La formule (7) indiquait des nombres supérieurs de 1 à 2% aux données du planimétrage, alors que la formule (8) s'accordait avec ces données, aux erreurs d'expérience près.

Toutes ces vérifications ont été faites sur des alliages normaux. Il resterait à vérifier l'application de ces formules dans le cas sortant quelque peu de la normale, des aciers extra-doux à palier et des alliages où l'allongement uniforme, soit disparaît par suite de l'écroutissage, soit se développe particulièrement, lorsque la recristallisation après écroutissage a lieu à la température de l'essai.

EXEMPLES D'APPLICATION. Les figures de 3 à 7 reproduisent les principaux paramètres de traction, en fonction de la composition, de quelques alliages techniques ayant subi le laminage. La case supérieure de chaque figure est consacrée aux diagrammes de la résistance à la traction ($R \text{ kg/mm}^2$) de la limite élastique ($Q \text{ kg/mm}^2$) et de l'allongement total à la rupture sur éprouvette internationale ($A\%$).

La case inférieure contient les diagrammes du travail de rupture à la traction ($T \text{ kgm/cm}^3$) et de l'allongement de striction sur éprouvette internationale ($b\%$). Les références se rapportent à la littérature indiquée à la fin du mémoire.



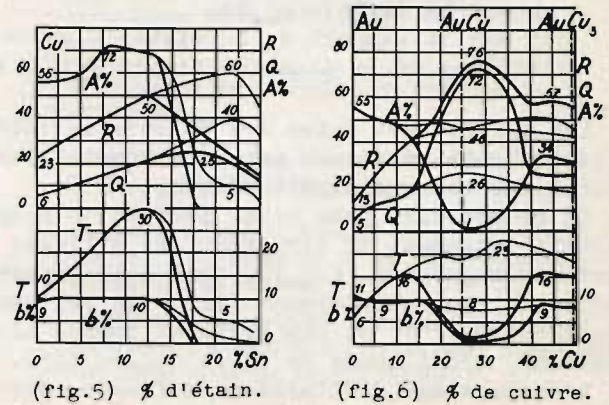
(fig. 3) % de nickel (fig. 4) % de zinc.

Fig.3. Cuivre-nickel. Paramètres de traction des alliages recuits suivant MM.BRONIEWSKI et KULESRA (1)

Fig.4. Cuivre-zinc. Paramètres de traction des alliages préservés d'oxydation et recuits suivant MM.BRONIEWSKI et TRZEBSKI (2)

Nous voyons que le travail de rupture à la traction varie dans de larges proportions en indiquant, avec plus de sûreté que tout autre paramètre mécanique, l'alliage le plus apte, dans sa catégorie, aux emplois techniques.

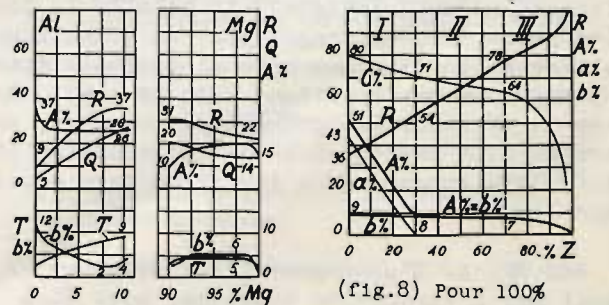
L'allongement de striction paraît se maintenir, avec une constance remarquable, aux voisinages de 10% pour toute une série d'alliages techniques du cuivre (fig.3,4,5,et 6), ce qui veut dire que l'allongement linéaire provoqué par la striction, équivaut alors au diamètre de l'éprouvette.



(fig.5) % d'étain. (fig.6) % de cuivre.

Fig.5. Cuivre-étain. Paramètres de traction des alliages soigneusement homogénéisés suivant MM. BRONIEWSKI et WAWRZYNKIEWICZ (3). La ligne épaisse correspond aux alliages recuits, la ligne fine aux alliages trempés à 720°

Fig.6. Or-cuivre. Paramètres de traction suivant MM.BRONIEWSKI et WESOŁOWSKI(4). La ligne épaisse correspond aux alliages recuits, la ligne fine aux alliages ayant subi à 650 la trempe, empêchant la formation des combinaisons AuCu et AuCu.



(fig.7) % de magnésium. (fig.8) Pour 100% d'écroutissage $Z\% = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \cdot 100$

Fig.7. Aluminium-magnésium. Paramètres de traction des alliages trempés à 450 suivant MM. BRONIEWSKI, BERNACIAK et BLAZEWSKI (5).

Fig.8. Propriétés mécaniques d'un laiton à 33% de zinc en fonction de l'écroutissage suivant MM. BRONIEWSKI et PELCZYNSKI (22). L'écroutissage est mesuré par la réduction de la section ($S_0 - S_1$) rapportée à la section primitive (S_0).

L'application de la formule 5 s'étend ainsi à certaines catégories d'alliages dont la composition exacte n'est pas connue. Par exemple, les essais de MM. SACHS et STENZEL(8) s'appliquent à des tôles d'un bronze désigné comme W.

Br. 6.I. dont l'allongement de striction n'avait pas été déterminé, mais qu'on prendra $b\% = 10$. La confrontation des mesures extrêmes avec le calcul donne les résultats suivants:

a	b	n	A% trouvé	A% calculé
5	15,7	n = 10	76,8	(76,8) admis
5	15,7	n' = 5	85,6	86,8
0,5	25	n' = 25	70,3	70,8

où a est l'épaisseur en mm.
 b est la largeur en mm.
 n est le rapport de la distance entre repères et le diamètre fictif = $1,13 \sqrt{ab}$

Les différences entre les valeurs calculées et trouvées ne dépassent pas sensiblement les limites des erreurs expérimentales.

On ne retrouve plus cette proportion simple pour l'allongement de striction des alliages aluminium-magnésium (fig.7), mais elle reparait pour les alliages or-argent (11), les alliages argent-cuivre (8), ou les alliages légers aluminium-zinc, additionnés de 3% de cuivre (13).

L'écrouissage de l'alliage influence surtout l'allongement uniforme $a\%$ qui s'annule pour un écrouissage Z_0 , qu'on peut déterminer d'avance avec une approximation satisfaisante par la formule de M.KRUPKOWSKI (1.cit.formule 37)

$$Z_0 = \frac{100 a\%}{a\% + 100}$$

L'annulation de $a\%$ indique la fin de la première phase d'écrouissage et provoque sur le diagramme de l'allongement total A% (fig.8) une inflexion caractéristique. Au delà de la première phase d'écrouissage, pour un grand nombre d'alliages, l'allongement total équivaut donc à l'allongement de striction, soit $A\% = b\%$. Au cours de la troisième phase d'écrouissage, annoncé surtout par la chute de la striction (C%, fig.8), l'allongement de striction tend aussi à s'annuler.

RESUME. 1. L'allongement à la rupture A%, établi par l'épreuve de traction, peut être scindé, sans essai supplémentaire, en allongement uniforme $a\%$ et en allongement de striction, $b\%$.

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

où d est le diamètre de l'éprouvette avant l'essai et d après rupture, au voisinage des repères.

La connaissance de l'allongement de striction permet la comparaison des allongements à la rupture pour différents types d'éprouvettes

non similaires:

$$A'\% = A\% + b\% \left(\frac{n}{n'} - 1 \right)$$

où A% et b% ont été obtenus pour l'éprouvette dont la distance entre repères est n fois son diamètre, alors que la valeur cherché de A% correspond à l'éprouvette dont la distance entre repères est n' fois son diamètre.

2. Le travail de rupture à la traction T, établi ordinairement par planimétrage du diagramme de traction, peut être calculée en partant de la résistance à la rupture R, de la limite élastique Q et de l'allongement à la rupture A%.

$$T = 0.0025(3R + Q) \cdot A\%$$

où T est exprimé en kilogrammètres par cm^3 du volume entre repères de l'éprouvette, lorsque R et Q sont en kg/mm^2 et A% correspond à l'éprouvette internationale (n = 10).

La connaissance du travail de rupture à la traction peut aider à la recherche du meilleur alliage en fonction de la composition, du traitement thermique et mécanique.

3. Des exemples de l'allongement de striction et du travail de rupture à la traction ont été donnés pour quelques alliages (fig.3-7). On a pu constater que pour certains alliages de cuivre, des plus employés dans l'industrie, l'allongement de striction se maintient au voisinage de 10%.

L'exemple de la variation des propriétés mécaniques en fonction de l'écrouissage (fig.8) montre que la flexion, bien connue, de la courbe d'allongement à la traction s'explique par l'annulation de l'allongement uniforme et la persistance de l'allongement de striction comme facteur unique de l'allongement à la rupture.

LITTERATURE CONCERNANT L'ALLONGEMENT DE STRICTION.

A. Allongement de striction en fonction de la composition.

1. BRONIEWSKI et KULESZA, Métaux et Corrosion, 12 (1937) p.67. Sur les propriétés mécaniques des alliages de cuivre avec le nickel.
2. BRONIEWSKI et TRZEBSKI, Revue de Fonderie Moderne, 28 (1934) p.173. Sur les propriétés mécaniques des alliages cuivre-zinc.
3. BRONIEWSKI et WAWRZYNKIEWICZ, Revue de Fonderie Moderne, 30 (1936) p.147. Sur les propriétés mécaniques des alliages cuivre-étain.
4. BRONIEWSKI et WESOLOWSKI, C.R.Acad.Sc.Paris, 198 (1934) p.370. Sur la structure des alliages or-cuivre. C.R. 198 (1934) p.69. Sur les propriétés mécaniques des alliages or-cuivre; Ann. Acad.Sc.Techn.Varsovie, t.I (1935) p.44, sur les alliages or-cuivre.
5. BRONIEWSKI, BERNACIAK et BLAZEWSKI, Ann. Acad.Sc.Techn.Varsovie, t.IV (1937) p.289. Sur les propriétés mécaniques des alliages aluminium-magnésium.

8. SACHS u. STENZEL, Mitteilungen d.deutsch. Material prüfungsanstalten, Sonderheft 10 p.58

6. BRONIEWSKI et JASLAN, C.R. Acad.Sc.Paris, 196 (1933) p.174. L'influence de l'oxygène sur les propriétés du cuivre. Prace Zakładu Metalurgicznego Politechniki Warszawskiej, t.3 (1933) p.95. En polonais avec résumé français.
7. BRONIEWSKI et LEWANDOWSKI, C.R. Acad. Sc. Paris, 201 (1935) p.273. L'influence du soufre sur les propriétés du cuivre.
8. BRONIEWSKI et KOSLACZ, C.R. Acad.Sc.Paris. 194 (1932) p.973. Sur les alliages argent-cuivre. Prace Zakładu Metalurgicznego Politechniki Warszawskiej t. 3 (1933) p.46. En polonais avec résumé français.
9. BRONIEWSKI et JASLAN, Ann.Acad.Sc.Techn. Varsovie, t.3 (1936) p.141. Sur les alliages du cuivre avec le manganèse.
10. BERNADZIKIEWICZ et BRONIEWSKI. Sur les alliages de l'aluminium avec le lithium, Prace Zakładu Metalurgicznego Politechniki Warszawskiej, t.3 (1933) p.102. En polonais avec résumé français.
11. BRONIEWSKI et WESOŁOWSKI, C.R.Acad.Sc.Paris, 194 (1932) p.2047. Les alliages or-argent comme type de solution solides continues. Prace Zakładu Metalurgicznego Politechniki Warszawskiej, t.3 (1933) p.84. En polonais avec résumé français.
12. BRONIEWSKI et PILKO, Ann.Acad.Sc.Techn. Varsovie, t.3 (1936) p.231. Sur les propriétés mécaniques des alliages légers aluminium-cuivre.
13. BRONIEWSKI et KOWALSKI, Ann.Acad.Sc.Techn. Varsovie, t.4 (1937) p.216. Sur les propriétés mécaniques des alliages zinc-aluminium.
14. BRONIEWSKI et LEWANDOWSKI, Revue de Fond. Moderne, 27 (1933) p.175. La désoxydation des laitons.
15. BRONIEWSKI, PRZEDPELSKI et SULOWSKI, C.R.Acad. Sc.Paris, 204 (1937) p.1874. Sur quelques propriétés physiques et mécaniques des aciers très purs.
- B. Allongement de striction en fonction de la température.
16. BRONIEWSKI et WESOŁOWSKI, Revue de Métall. 30 (1933) pp.395 et 453. L'influence de la température sur les propriétés mécaniques des laitons.
17. BRONIEWSKI et SZRENIAWSKI, Revue de Métall. 33 (1936) p.442. Influence de la température et de l'écroutissage sur les propriétés mécaniques d'un bronze pour médailles.
18. BRONIEWSKI et SZROJT, Ann.Acad.Sc.Techn.Varsovie, t.I (1935) p.70. Sur les propriétés mécaniques de la perlite industrielle.
- C. Allongement de striction en fonction de l'écroutissage.
19. BRONIEWSKI et KROL, C.R.Acad.Sc.Paris, 193 (1931) p.38. Sur l'écroutissage du fer. (armco).
20. KRUPKOWSKI, Rev.de Métall. 28 (1931) p.529, 598, 641; 29 (1932) pp.16 et 74. Propriétés mécaniques du cuivre.
21. KRUPKOWSKI et BALICKI, Ann.Acad.Sc.Techn. Varsovie, 3 (1936) p.90. Propriétés physiques et mécaniques du cuivre écroui.
22. BRONIEWSKI et PELCZYNSKI, Revue de Métall. 31 (1934) pp.48 et 90. Sur l'écroutissage, le revenu et le recuit des laitons.
23. BRONIEWSKI et ZIEBINSKI, Ann.Acad.Sc.Techn. Varsovie, 2 (1935) p.199. Sur les propriétés mécaniques de l'argent monétaire polonais.
24. BRONIEWSKI et PERLBERG, Ann.Acad.Sc.Techn. Varsovie, 4 (1937) p.199. Sur le traitement thermique et l'écroutissage de l'alliage argent-cuivre, I-er titre polonais. (940‰)
25. BRONIEWSKI et GLOTZ, C.R.Acad.Sc.Paris, 204 (1937) p.1473. Sur les propriétés physiques et mécaniques du fer pur, en fonction de l'écroutissage. Voir aussi les NN 1, 2, 5 et 17.
- D. Allongement de striction en fonction du traitement thermique.

Voir les NN 3, 4, 5, 10, 12, 13, 18, 21, 23 et 24.

