

CONTROLE DES CARACTERISTIQUES DE RESISTANCE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM STRUCTURAUX DE FABRICATION HONGROISE

Par

S. SZÁNTÓ

Chaire des Constructions d'Acier, Université Technique de Budapest

(Reçu le 2 avril 1969)

Présenté par le Prof. Dr. O. HALÁSZ

1. Préambule

Le Ministère de Construction a chargé la Chaire des Constructions d'Acier de l'Université Technique à Budapest d'examiner les possibilités de l'utilisation structurale des alliages d'aluminium produits dans ce pays, et d'élaborer une spécification tentative de dimensionnement et d'étude des projets. Au cours de ces travaux il s'imposait d'une part de contrôler par des essais les caractéristiques de résistance de certains alliages d'aluminium et, de l'autre, de dépouiller et d'analyser les milliers de données, accumulées pendant des années dans les usines de fabrication. Dans cette étude sont traités les essais effectués et leurs résultats.

2. Objectif des essais

Les essais ont eu pour but:

- a) de déterminer les valeurs effectives des caractéristiques de résistance de certains alliages et les tendances de leurs interdépendances;
- b) d'établir les rapports entre des contraintes variées (à la traction, à la compression, à la torsion) et leurs rapports d'écoulement réduits à la traction.

Les conceptions pour déterminer les valeurs effectives des caractéristiques de résistance ont été motivées par les considérations suivantes:

Il est connu que la relation entre les états de contrainte et de déformation d'un corps soumis à un effort s'appuie sur nombreuses hypothèses dans des calculs pratiques. Telles sont: la matière du corps est continue, elle est homogène et isotrope, la déformation est directement proportionnelle à l'effort appliqué, etc.

Donc, la théorie se rapporte aux corps revêtus des propriétés fictives et ne peut être appliquée aux membres structuraux produits des matières véritables qu'après un contrôle expérimental approprié.

Les hypothèses relatives au corps fictif ne se réalisent pour les corps véritables que dans certaines limites de charge. Donc le domaine de validité de

ces hypothèses et des corrélations théoriques consécutives ne peut être déterminé qu'en se basant sur des analyses détaillées expérimentales des propriétés mécaniques des matières véritables.

La littérature spéciale — surtout celle de l'étranger — y relative rend compte de nombreuses données, contrôlées aussi par des essais, sur les caractéristiques de résistance des alliages d'aluminium, néanmoins, de l'avis de l'auteur de cette étude, elles ne peuvent être adoptées sans un contrôle approprié. En effet, les résultats des essais montrent qu'une faible modification des matières d'alliage fait subir aux propriétés mécaniques des alliages d'aluminium un changement important.

Le contrôle par des essais des proportions des contraintes provoquées par des sollicitations variées, réduites à la tension, a été motivé d'abord par la nécessité de posséder des données certaines d'origine hongroise. En effet, il est bien connu qu'on ne fait pas de distinction entre la résistance à la tension et celle à la compression de l'acier doux, parce qu'il y a une faible différence. Ce principe était appliqué dans la pratique jusqu'à présent aussi pour les alliages d'aluminium mais, comme il est à présumer, sans en être persuadé par vérification expérimentale. En outre, les propriétés de la matière n'ont pas été soumises aux essais de torsion et ainsi, à cet égard, on ne dispose point d'expérience domestique.

Pour conduire des essais il fallait préciser tout d'abord les alliages d'aluminium de production hongroise qui peuvent être considérés pour l'utilisation aux constructions structurales. Les investigations ont eu pour résultat le choix des types d'alliage d'aluminium suivants:

1. Type d'alliage: AlZnMgTi, autrement dit HEGAL,
2. Type d'alliage: AlMgSi, autrement dit MASZIL,
3. Type d'alliage: AlMg, autrement dit NAUTAL,
4. Type d'alliage: AlCuMg, autrement dit DURAL.

Les caractéristiques de résistance et des autres propriétés physiques des alliages énumérés ne sont point uniformes. Les propriétés de la matière de base peuvent être sensiblement influencées par traitement thermique (par affinage) ou par écrouissage approprié. De ce point de vue c'est l'alliage HEGAL qui révèle le comportement le plus marquant et qui, tout en atteignant sa résistance finale par traitement d'affinage thermique, n'est pas aussi sensible que les autres alliages d'aluminium susceptibles d'affinage. Cet alliage se raffermi après l'affinage sans aucune influence extérieure et n'atteint ses propriétés de résistance finales qu'après 90 à 100 jours environ. Cette circonstance est de grande importance au point de vue de la réception et de l'utilisation de la matière. L'observation de la prolongation de raffermissement peut conduire aux graves erreurs en ce qui concerne l'appréciation des propriétés de résistance de l'alliage en question qui ne peuvent être négligées dans la pratique d'ingénieur.

Au cours des essais les considérations de validité générale ont servi de base de départ:

Le rapport entre la charge appliquée à l'éprouvette et la transformation dimensionnelle de l'éprouvette est représenté par le diagramme tensions-déformations de l'éprouvette. Le résultat de l'essai était la fonction

$$\delta = f(\Phi) \quad (1)$$

δ étant le déplacement longitudinal ou la rotation relative des deux sections transversales repérées et Φ la charge (force ou moment). En connaissance du diagramme tensions-déformations de l'éprouvette, on peut établir aisément que l'allongement total se compose de deux parts: de l'allongement disparaissant après la suppression de l'effort (ou l'allongement élastique δ_e), et de l'allongement permanent (ou plastique δ_p). Donc, nous avons

$$\delta = \delta_e + \delta_p \quad (2)$$

Comme il est connu, l'allongement permanent est produit par la déformation plastique de la partie subissant les efforts maximaux. De ce fait, au cours des essais on s'efforçait d'appliquer un cas de charge où l'état de contraintes de l'éprouvette était homogène. De cette manière, le commencement de la déformation plastique s'étendant à un volume important ressort mieux, et les résultats susceptibles à amener des conclusions erronées concernant les propriétés de la matière peuvent être éliminés.

Les dimensions et la forme géométrique des éprouvettes ont été choisies en vue de satisfaire aux exigences fondamentales suivantes:

— Les dimensions doivent être assez importantes pour que les résultats expérimentaux soient indépendants des propriétés individuelles des grains de la matière et que les allongements puissent être mesurés à une précision appropriée.

— L'état de contraintes de l'éprouvette doit être aussi homogène que les contraintes locales, naissant aux points de serrages, se réduisent au minimum.

— La charge appliquée à l'éprouvette sera simple, pour assurer l'état de contraintes uniforme de l'éprouvette à toutes les phases de l'essai.

— La forme géométrique de l'éprouvette restera stable au moins jusqu'à la limite de fluage (flambage et des déformations pareilles ne sont pas admises).

Les exigences énumérées ci-dessus pouvaient être assurées en général pour les éprouvettes utilisées.

3. Essais de traction et de compression

Les proportions des éprouvettes de traction ont été déterminées conformément aux spécifications de la norme hongroise MSZ N° 105—59 y relative. Au choix de la longueur de l'éprouvette il fallait s'ajuster à deux conditions:

l'une était que l'éprouvette était d'autant plus appropriée à la mesure des déplacements que la longueur L_0 était plus grande. Mais cette circonstance exerçait une influence importante sur la valeur de l'allongement spécifique à la rupture, ce qui caractérise les propriétés plastiques de la matière. Afin de l'assurer, la longueur normalisée L_0 , égale au décuple du diamètre, a été repérée sur l'éprouvette, et l'allongement spécifique de rupture a été établi sur la base de cette longueur.

La forme et les dimensions de l'éprouvette de compression ont été déterminées conformément aux résultats d'essais publiés surtout dans la littérature étrangère (soviétique) en tenant compte des instruments d'essai disponibles. C'est pourquoi une éprouvette tubulaire, de forme circulaire et de paroi épaisse a été choisie dont la longueur L_0 était exactement le double du diamètre extérieur D_0 . La longueur L_0 a été déterminée par une série d'essais préalable. Étant donné qu'on ne disposait que d'acier en barre pressé de diamètre de 20 mm, pour mesurer les déformations appartenant au tronçon initial on ne pouvait utiliser que des jauges d'une longueur de base de 20 mm. Les surfaces d'extrémité de l'éprouvette ont été façonnées de forme conique obtuse d'un angle d'inclinaison de 6 degrés (choisi à titre d'essai). Ceci avait comme but de réduire le frottement se produisant entre les surfaces d'appui de la presse et de l'éprouvette au cours de la compression, susceptible de troubler l'état de contraintes uniaxial. Le centrage de l'éprouvette et des plaques de compression a été réalisé par des pointes de centrage se trouvant dans les plaques de compression et correspondant au diamètre de l'éprouvette. L'une des surfaces des plaques de compression en acier dur était façonnée de forme conique d'un angle identique à celle de l'éprouvette.

Cette série d'essais a permis de déterminer les caractéristiques mécaniques de la matière par rapport à chacun des deux types de sollicitation d'une part, et a fourni une base de comparaison des comportements de la matière en cas de traction et de compression, pour en établir une relation des caractéristiques connexes, de l'autre. Tous ceux-ci jouent un rôle très important dans la déduction des relations de dimensionnement.

4. Essais de torsion

Dans la pratique d'ingénieur il se produit souvent l'état de contraintes de cisaillement simple, l'étude duquel est indispensable à la dérivation des relations et des formules de dimensionnement. Cet état de contraintes peut être produit le plus simplement sur une éprouvette cylindrique pleine, sollicitée par un moment de torsion. L'éprouvette utilisée aux essais a été préparée en tenant compte de l'équipement mécanique et de l'instrument de mesure disponibles, de même que des données figurant dans la description des essais publiés dans la littérature.

Les essais de torsion ont eu pour but de définir le diagramme de cisaillement $\tau - \gamma$ de la matière, ainsi que le module d'élasticité de cisaillement G .

Le tronçon initial du diagramme de torsion caractérise la déformation de la matière dans le domaine élastique, tandis que le deuxième tronçon correspond à la déformation élastique-plastique. Pour construire le diagramme de cisaillement, il faut connaître les corrélations respectivement entre le moment de torsion (M_t) et la contrainte de cisaillement τ dans la section transversale de l'éprouvette pleine, et entre l'angle de rotation q_t et la déviation angulaire spécifique γ .

La déduction de cette corrélation part des conditions suivantes (procédé courant dans la théorie de torsion);

- au cours de la déformation, les génératrices restent rectilignes;
- les rayons ne se déforment pas;
- les sections transversales de l'éprouvette restent des plans.

(Il est à noter que ces suppositions ne peuvent être considérées comme valables que jusqu'à la valeur de $\gamma \cong 0,2$ à $0,25$ radian, ce qui était en général assuré pendant la série d'essais.)

En fin de compte la série d'essais de cisaillement a réussi à fournir des données d'une importance marquée au point de vue des spécifications de dimensionnement et qui, jusqu'à présent, manquaient à la pratique d'ingénieur en Hongrie.

5. Évaluation des résultats d'essai

Les résultats d'essai obtenus dans les essais de traction, de compression et torsion précisés ci-dessus, sont récapitulés dans le Tableau 1, groupés par types d'alliage. Ces chiffres montrent que les exigences posées aux essais pouvaient être satisfaites et l'objectif désigné a été atteint. Par là, nous disposons de données d'essai qui permettent d'étudier d'une manière plus exacte les caractéristiques physiques et de résistance des alliages d'aluminium structuraux de production hongroise. Les chiffres du tableau, c'est-à-dire les valeurs numériques de toutes les caractéristiques de matière ont été calculées comme moyennes arithmétiques de plusieurs (10 à 20) résultats d'essai obtenus dans des conditions identiques et, par conséquent, elles peuvent servir de base aux conclusions appropriées. Les résultats d'essai justifient démonstrativement la validité des conclusions suivantes:

a) la valeur numérique du module d'élasticité E à la traction et à la compression peut être considérée à peu près identique pour tous les alliages examinés, parce que la différence maximale ne dépasse pas les 6,5 à 7,0%. donc est peu importante. Il sera convenable de prendre la moyenne arithmétique arrondie des deux types de sollicitation comme module d'élasticité unique.

Par suite, les valeurs unifiées du module d'élasticité E de la matière tant de traction que de compression, sont relevées dans le tableau suivant:

Tableau 1
Caractéristiques mécaniques déterminées expérimentalement

N°	Symbole	Désignation et état de l'alliage				Note
		AlZnMgTi	AlMgSi	AlMg 3	AlMg 5	
1.	E_t	697 400	706 000	736 200	745 100	kp/cm ²
2.	E_c	682 500	713 200	688 600	696 500	kp/cm ²
3.	G	270 200	263 800	263 000	263 000	kp/cm ²
4.	σ_{pt}	2 300	1 650	1 500	2 050	kp/cm ²
5.	σ_{pc}	1 100	1 200	1 100	1 450	kp/cm ²
6.	σ_{Ft}	2 550	1 850	1 650	2 200	kp/cm ²
7.	σ_{Fc}	1 800	1 650	1 550	2 080	kp/cm ²
8.	σ_F	1 300	1 025	—	—	kp/cm ²
9.	σ_{Bt}	4 000	2 950	2 500	3 100	kp/cm ²
10.	$\bar{\sigma}_{Bt}$	4 500	3 400	2 750	3 600	kp/cm ²
11.	σ_{Bc}	5 600	5 600	4 100	5 600	kp/cm ²
12.	$\bar{\sigma}_{Bc}$	4 500	4 300	3 100	3 900	kp/cm ²
13.	τ_B	2 300	2 150	—	—	kp/cm ²
14.	$\delta_{10\%t}$	14,79	18,72	11,70	17,25	%
15.	$\delta_{n\%c}$	29,20	32,32	33,5	42,5	%
16.	γ_B	0,290	0,538	—	—	radian
17.	ψ_t	34,26	30,05	47,43	47,60	%
18.	ψ_c	30,42	53,72	—	—	%

Tableau 2

Alliage	AlZnMgTi	AlMgSi	AlMg 3	AlMg 5
E (kp/cm ²)	690 000	710 000	710 000	720 000

Bien entendu, les valeurs indiquées ne portent que sur les alliages de production hongroise. Les valeurs publiées dans la littérature, concernant les types d'alliages étrangers — d'ailleurs à peu près identiques à ceux hongrois au point de vue de la composition — sont bien conformes à celles présentées ci-dessus.

b) Les valeurs numériques de la limite de fluage σ_F ou de son équivalente, de la contrainte $\sigma_{0,2}$ — adoptée pour l'une des caractéristiques de résistance principales de la matière — obtenues des deux types de sollicitation (traction, compression), ne peuvent pas être prises pour identiques, la différence étant importante. Le résultat sera particulièrement intéressant à l'analyse des problèmes de stabilité (flambage d'une barre soumise à la compression centrique, examen de déversement des lames, etc.) ce qui joue un rôle beau-

coup plus important pour les structures d'aluminium que pour les structures en acier.

Les valeurs numériques de la limite de fluage établies expérimentalement ne peuvent être prises comme base des calculs, parce que les chiffres donnés dans les normes diverses ne sont pas des moyennes arithmétiques, mais des valeurs réduites.

L'analyse et la méthode de détermination de cette caractéristique de matière, nommée limite de fluage nominale, ne seront pas traitées ici, seuls les rapports expérimentaux des $\sigma_{0,2}$ à la traction et à la compression seront présentés; en effet, la prise en considération de ces derniers a d'importance au point de vue du dimensionnement pratique. Comme il est toujours convenable de partir de l'effort de traction, cet essai de routine étant le plus aisé, il est recommandé d'exprimer la valeur de la limite de fluage à la compression en fonction de celui à la traction par la corrélation suivante:

$$\sigma_{0,2\text{co}} = \nu_F \cdot \sigma_{0,2t} \tag{3}$$

Les valeurs du coefficient ν_F sont indiquées dans le tableau 3.

Tableau 3

Alliage	AlZnMgTi	AlMgSi	AlMg 3	AlMg 5
ν_F	0,70	0,90	0,94	0,94

La contrainte de cisaillement au fluage τ_F à la torsion se prête à fournir un coefficient ν_F d'après les mêmes considérations qui peut être mis pour tous les alliages examinés uniformément à:

$$\nu_F = 0,55.$$

Les résultats d'essai et les données de la littérature cadrent bien avec cette valeur.

c) Au point de vue du dimensionnement, les valeurs expérimentales des résistances à la traction et à la compression ne servent qu'à fournir des valeurs plus exactes pour le rapport de la limite de fluage à la tension de rupture, à l'aide de la relation

$$\nu_{FB} = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B} \tag{4}$$

Les valeurs calculées par cette formule sont relevées dans le tableau 4.

Tableau 4

Solicitation	Valeurs de r_{FB} par alliages				Moyenne
	AlZnMgTi	AlMgSi	AlMg ₂	AlMg ₃	
Traction	0,64	0,63	0,66	0,71	0,66
Compression	0,45	0,30	0,38	0,37	0,38
Torsion	0,57	0,48	0,50*	0,50*	0,51

* Valeurs calculées.

Les valeurs moyennes du tableau montrent que les alliages d'aluminium examinés possèdent des propriétés plastiques similaires à celles de l'acier doux, ce qui est un fait très important au point de vue de l'utilisation structurale de l'aluminium.

On peut conclure que les résultats et les expériences obtenus par des essais effectués avec près de 320 éprouvettes constituent une base sûre au choix du procédé de dimensionnement le plus convenable et à la vérification des motifs théoriques de certaines prescriptions.

La détermination par essais des caractéristiques mécaniques des alliages d'aluminium — en particulier le diagramme de cisaillement — est une nouvelle initiative dans ce pays. La plupart des caractéristiques en question ont été déterminées jusqu'ici par des essais de traction seuls, et les spécifications en vigueur ont été élaborées par analogie aux relations utilisées pour les structures d'acier, en tenant compte des données littéraires. Bien entendu, les résultats d'essai ne peuvent être pris pour valeurs exactes, toutefois leur connaissance permet d'améliorer les spécifications en vigueur, à observer de plus près les propriétés de l'aluminium.

Résumé

A l'effet de la rédaction des spécifications de dimensionnement des structures en aluminium il s'imposait de contrôler par des essais les caractéristiques de résistance des alliages d'aluminium structuraux produits en Hongrie. Les caractéristiques de résistance ont été déterminées, en général, sur la base de vingt résultats d'essais, conformément aux prescriptions de la norme hongroise γ relative. Les résultats sont de haute importance au point de vue de l'applicabilité des alliages d'aluminium domestiques dans l'industrie du bâtiment; les essais de torsion sont, dans ce pays, de caractère pionnier.

Premier assistant Dr. SÁNDOR SZÁNTÓ, Budapest XI., Műegyetem rakpart 3.