



Le pliage de l'aluminium

Sofiène Amira

21 juin 2018

Le pliage de l'aluminium

1. Pliage

Le pliage est un procédé de mise en forme de matériaux métalliques en forme de feuilles par l'imposition d'une contrainte supérieure à la limite d'élasticité du matériau, mais inférieure à sa résistance maximale. Les forces appliquées durant le pliage s'exercent dans des directions opposées, comme dans le cas du découpage/poinçonnage de feuilles métalliques. Cependant, les forces de pliages sont plus écartées comparativement aux forces de découpage/poinçonnage, ce qui entraîne une distorsion plastique du matériau sans rupture.

Pliage en l'air (pliage en 3 points) :

Lors du pliage en l'air, le poinçon ne va pas à fond de matrice, ce qui permet, avec les mêmes outils, de faire des pliages à angles différents (Figure 4). Le rayon intérieur minimal de pliage est égal à l'épaisseur de la feuille à plier. L'usure de l'outil générée par cette méthode est modérée ce qui lui donne une bonne durée de vie. Par contre, cette méthode de pliage entraîne un important retour élastique.

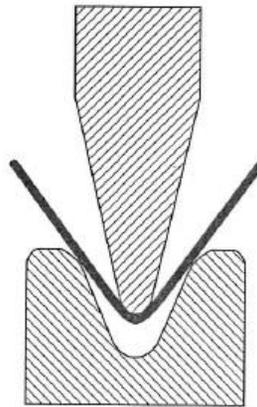


Figure 1, [1]

Pliage à fond (Bottom bending) :

Lors du pliage à fond, le poinçon va à fond de matrice, ce qui donne un angle de pliage identique à celui du poinçon (Figure 5). Cette méthode de pliage nécessite plus de force que le pliage en l'air (3 à 5 fois). Le rayon intérieur minimal

de pliage est égal à 0,7 fois l'épaisseur de la feuille à plier. L'outil s'use plus comparé à celui du pliage en l'air. Cependant, le pliage à fond permet d'éliminer le retour élastique. Une variante de ce procédé consiste à utiliser un poinçon à bord tranchant ce qui permet d'obtenir un très faible rayon intérieur minimal de pliage.

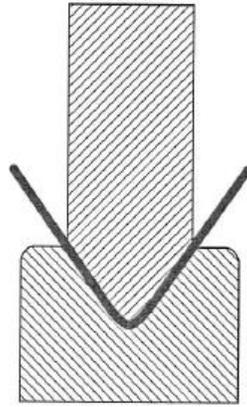


Figure 2, [1]

Outils

Afin d'allonger la durée de vie des outils de pliage, ces derniers sont conçus, autant que possible, avec des angles arrondis. Des exemples d'outils de pliage avec différentes conceptions sont présentés à la figure 6 :

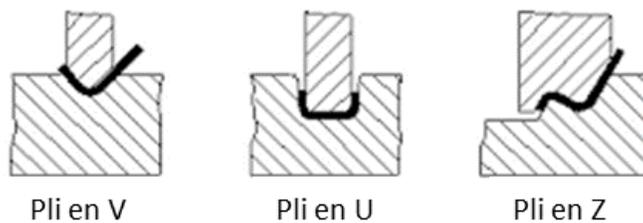


Figure 3, [1]

Les outils utilisés pour le pliage de l'aluminium sont généralement les mêmes que ceux utilisés pour le pliage des aciers, et sont fabriqués à partir d'aciers à outils caractérisés par une résistance et une ténacité élevées, ainsi qu'une bonne résistance à l'usure. Les matériaux les plus utilisés pour la fabrication des outils de pliage sont le A2, 4140 et D2.

Tolérances dimensionnelles

Les tolérances en pliage dépendent du type de la machine utilisée et des formes à réaliser. Lors du pliage de formes simples caractérisées par un grand rapport longueur/largeur, une tolérance de $\pm 0,8$ mm peut être maintenue. Pour des pièces plus larges de formes complexes, la tolérance peut atteindre $\pm 1,6$ mm.

Retour élastique

Le retour élastique est l'ouverture de l'angle du pli qui, due à l'élasticité du métal de la zone déformée, se produit quand cesse l'application de la force de pliage. Comme le montre la figure 7, l'angle du retour élastique est la différence entre l'angle de l'outil et l'angle de la pièce après pliage.

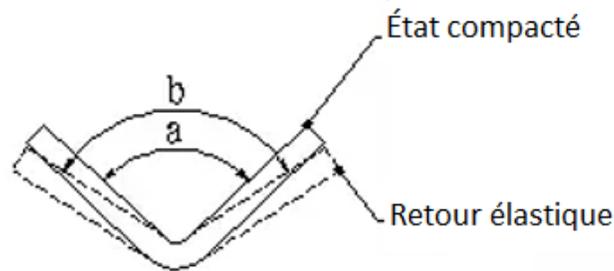


Figure 4

La valeur du retour élastique dépend principalement de la limite d'élasticité (R_e) et de l'épaisseur du matériau (t) et du rayon de pliage (r). Ainsi, l'angle du retour est proportionnel à la limite d'élasticité et au rapport r/t . L'effet de ces variables est montré au tableau 3 qui donne les tolérances sur le retour élastique de l'alliage d'aluminium à haute résistance mécanique 2024 à l'état recuit ($R_e = 75$ MPa) et traité T3 ($R_e = 345$ MPa) en fonction des épaisseurs et des rayons de pliage.

Tableau 1, [2]

Épaisseur de feuille		Retour permis, en degré, pour le rayon de pliage, mm (in.) de:							
mm	in.	2.4 ($\frac{3}{32}$)	3.2 ($\frac{1}{8}$)	4.8 ($\frac{3}{16}$)	6.4 ($\frac{1}{4}$)	7.9 ($\frac{5}{16}$)	9.5 ($\frac{3}{8}$)	11.1 ($\frac{7}{16}$)	12.7 ($\frac{1}{2}$)
2024-O et 7075-O									
0.51	0.020	3	4	$5\frac{1}{2}$	$7\frac{1}{2}$	$8\frac{1}{2}$	9	$9\frac{1}{2}$	12
0.64	0.025	$\frac{3}{24}$	$\frac{3}{34}$	$5\frac{1}{2}$	$6\frac{1}{2}$	8	$\frac{1}{84}$	$\frac{3}{84}$	$\frac{3}{104}$
0.81	0.032	$\frac{1}{24}$	3	$\frac{3}{44}$	6	$\frac{3}{64}$	7	$\frac{1}{72}$	$\frac{1}{92}$
1.02	0.040	2	3	4	5	6	$\frac{1}{64}$	$\frac{3}{64}$	$\frac{3}{84}$
1.29	0.051	2	$2\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{2}$	4	5	$\frac{1}{54}$	$\frac{3}{54}$	$\frac{1}{72}$
1.63	0.064	$\frac{1}{12}$	2	$\frac{3}{24}$	$\frac{3}{34}$	$4\frac{1}{2}$	5	$\frac{1}{52}$	$\frac{3}{64}$
2.06	0.081	1	$1\frac{1}{2}$	2	$2\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{4}$	$3\frac{1}{2}$	4	$\frac{3}{44}$
2.39	0.094	...	...	$\frac{3}{14}$	$\frac{1}{22}$	3	$\frac{1}{34}$	$\frac{3}{34}$	$\frac{1}{42}$
3.18	0.125	...	...	$\frac{1}{12}$	2	$\frac{1}{24}$	$\frac{3}{24}$	3	$\frac{3}{34}$
2024-T3									
0.51	0.200	10	12	$15\frac{1}{2}$	19	$22\frac{1}{2}$	24	$27\frac{1}{4}$	$33\frac{1}{2}$
0.64	0.025	$\frac{3}{84}$	$10\frac{1}{2}$	14	$\frac{3}{164}$	$\frac{3}{174}$	21	23	$28\frac{1}{2}$
0.81	0.032	$\frac{3}{74}$	$\frac{3}{84}$	12	$14\frac{1}{2}$	$\frac{3}{164}$	$\frac{3}{174}$	$19\frac{1}{4}$	24
1.02	0.040	$\frac{1}{74}$	$\frac{1}{84}$	$10\frac{3}{4}$	$12\frac{3}{4}$	$14\frac{1}{2}$	$15\frac{1}{4}$	17	$20\frac{1}{2}$
1.29	0.051	...	...	9	$10\frac{1}{2}$	$12\frac{1}{4}$	13	$14\frac{1}{2}$	$16\frac{3}{4}$
1.63	0.064	...	...	8	$\frac{3}{94}$	$11\frac{1}{4}$	12	$12\frac{3}{4}$	15
2.06	0.081	...	...	...	...	$9\frac{1}{2}$	$10\frac{1}{2}$	$11\frac{1}{4}$	13
2.39	0.094	...	...	...	...	$\frac{3}{84}$	$\frac{3}{94}$	$10\frac{1}{2}$	12

D'autres variables comme l'orientation de la feuille pliée par rapport à la direction de laminage (ou anisotropie) et de la force de maintien (compactage) appliquée lors du pliage affectent également la valeur du retour élastique des alliages d'aluminium. La figure 8 montre l'effet de ces deux variables sur le retour élastique de l'alliage d'aluminium 1050 recuit, où on observe notamment l'effet bénéfique de l'augmentation de la force de maintien sur la réduction du retour élastique. L'effet de l'anisotropie est plus marqué pour les faibles forces de maintien (2,5 kN) sans montrer de tendances claires.

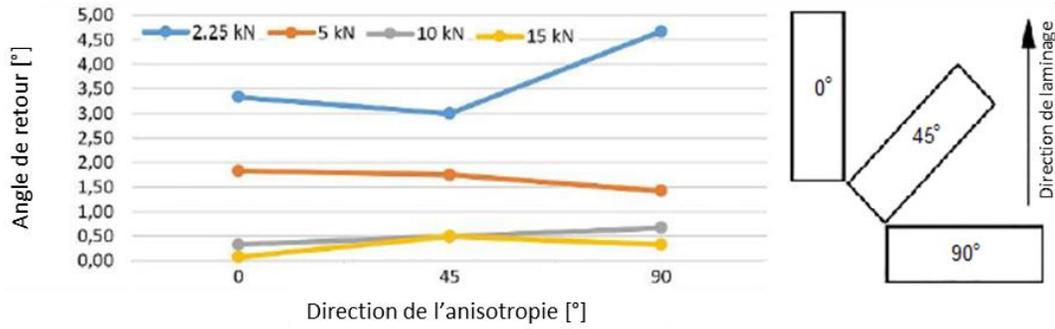


Figure 5, [3]

La température des outils de pliage affecte également le retour élastique. La figure 9 qui montre l'effet combiné des températures du poinçon et de la matrice sur le retour élastique du 2024-T4 permet de conclure que plus la température des outils augmente, plus le retour élastique diminue. Ce comportement est une conséquence de la diminution de la résistance mécanique avec l'augmentation de la température de la zone de pliage.

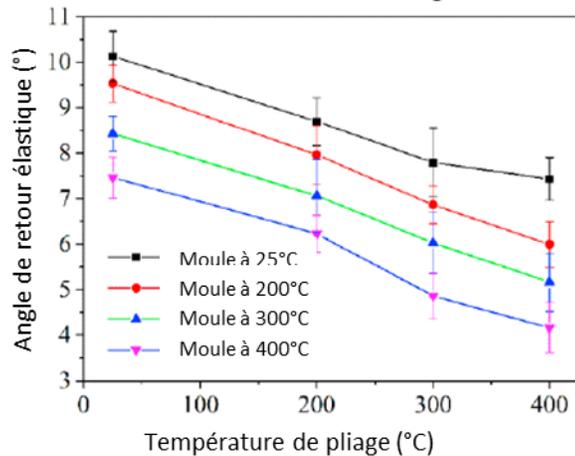


Figure 6, [4]

La compensation du retour élastique peut se faire de deux façons : (1) par pliage avec correction où on planifie l'obtention d'un angle plus grand qu'il en faut de façon à compenser le retour élastique, et (2) par le pliage à fond en compressant la pièce à la fin du processus de pliage afin d'induire une déformation plastique.

Rayons de pliage

Les rayons de pliage dépendent des propriétés de l'alliage et de ceux de l'outil (forme, dimensions, condition, etc.). La littérature scientifique propose des tables

pour les alliages d'aluminium où sont donnés les rayons de pliage minimum en fonction de l'épaisseur, comme le montre le tableau 2.

Tableau 2, [5]

Alliage	Traitement	Épaisseurs (en mm)							
		0,4	0,8	1,6	3,0	4,0	6,0	10	12
1100, 1200	○	0	0	0	0	0	0,5	1	1,5
	H12	0	0	0	0,5	1	1	1,5	2
	H14	0	0	0	1	1	1,5	2	2,5
	H16	0	0,5	1	1,5	-	-	-	-
	H18	1	1,5	2	3	-	-	-	-
5005	○	0	0	0	0	0,5	1,5	2	2,5
	H12	0	0	0	0,5	1	1	1,5	2
	H14	0	0	0	1	1	1,5	2	2,5
	H16	0,5	1	1	1,5	-	-	-	-
	H18	1	1,5	2	3	-	-	-	-
5083	○	-	-	0,5	1	1	1	1,5	2
	H321	-	2	2	2	2,25	2,5	3,5	3,5
	H116	-	-	2	3	3,5	4	-	-
6061	○	0	0	0	1	1	1	1,5	2
	T4	0	0,5	1	1,5	2,5	3	3,5	4
	T6	1	1	1,5	2,5	3	4	4,5	5

Problèmes et dépannage

- ❖ Imprécision des angles des pièces fabriquées : plusieurs raisons peuvent être impliquées comme : l'épaisseur programmée du matériau diffère de l'épaisseur réelle, non-uniformité de l'épaisseur du matériau, non-uniformité du matériau, usure de l'outil, ou des raisons opératoires (erreur de programmation, positionnement des axes, connexion de la glissière, etc.)
- ❖ Imprécision de la taille des pièces fabriquées : en plus de l'usure de l'outil, ce défaut est souvent relié à des problèmes de machine comme l'alimentation

électrique, le servomoteur, l'encodeur du servomoteur et les câbles, le parallélisme et la rectitude de la butée arrière, parallélisme du dispositif d'anti-recul, etc.)

- ❖ Porte-à-faux (Overhang)
- ❖ Déchirure de la zone pliée

Calcul de la force de pliage en V

L'équation permettant de déterminer la force de pliage en V est :

$$F = \frac{1,33 S W t^2}{D}$$

Avec :

F : Force de pliage, lbf

S : Résistance maximale, psi

W : Longueur de pliage, po

t : Épaisseur du matériau à plier, po

D : Ouverture du V de la matrice, po (voir figure 7)

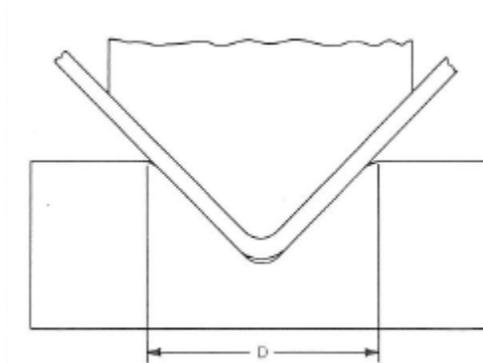


Figure 7.

Exemple de calcul :

Pour plier en V une feuille en alliage d'aluminium 5086-H32 ($R_m = 42000$ psi) de $3/16''$ d'épaisseur, sur une longueur de $10'$, et ce dans une matrice avec une ouverture de $2''$, la force nécessaire est :

$$F = \frac{1,33 \cdot 42000 \cdot 120 \cdot 0,0351^2}{2} = 4130 \text{ lb}$$

Soit 18,4 kN environ

Écrit par Sofiene Amira

Références

1. E Paul Degarmo, J. T. Black and Ronald A. Kohser, Materials and Processes in Manufacturing, 9th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
2. ASM Specialty Handbook, Aluminum and Aluminum alloys, ASM International, 1993.
3. M. Emin Erdin, A. Atmaca, Effects of Holding Force on the Springback Behavior of Annealed Aluminum Plates, Procedia Engineering 149, 2016, p 56 – 61.
4. L Deng, X Wang, J Jin, L Xia, Springback and hardness of aluminum alloy sheet part manufactured by warm forming process using non-isothermal dies, Procedia Engineering 207, 2017, p 2388–2393.
5. NALCO Catalogue Technical 2009, p17-p20
(<http://www.nalco.co.nz/sites/default/files/NALCO%20catalogue%20TECHNICAL%202009%20P17-20%20Bending%20Aluminium.pdf>)