



Moulage Généralités Capacités des procédés

Guy Morin ing.
Franco Chiesa Ph.D.

Centre de Métallurgie du Québec

6 février 2019

Moulage – Généralités – capacités des procédés

Auteurs : Guy Morin, ing. et Franco Chiesa, Ph.D.

1. Introduction

Le moulage dans des moules en sable et argile est le plus ancien des procédés de fonderie, mais le bas point de fusion de l'aluminium permet aussi d'utiliser des moules métalliques. On classifie normalement les procédés de moulage de l'aluminium de la manière suivante :

Procédés à moule temporaire avec modèle permanent

- Moulage au sable à vert et au sable à prise chimique*

Procédés à moule temporaire avec modèles perdus

- Moulage en cire perdue*
- Moulage à modèle évaporatif (*Lost foam*)

Procédés à moule permanent

- Moulage en moule permanent gravité*
- Moulage en moule permanent par basculement*
- Moulage en moule permanent basse pression*
- Moulage sous pression*
- Moulage sous pression sous vide*
- Moulage semi-solide*

**Consulter les fiches descriptives des procédés les plus répandus aux sections appropriées du site Web.*

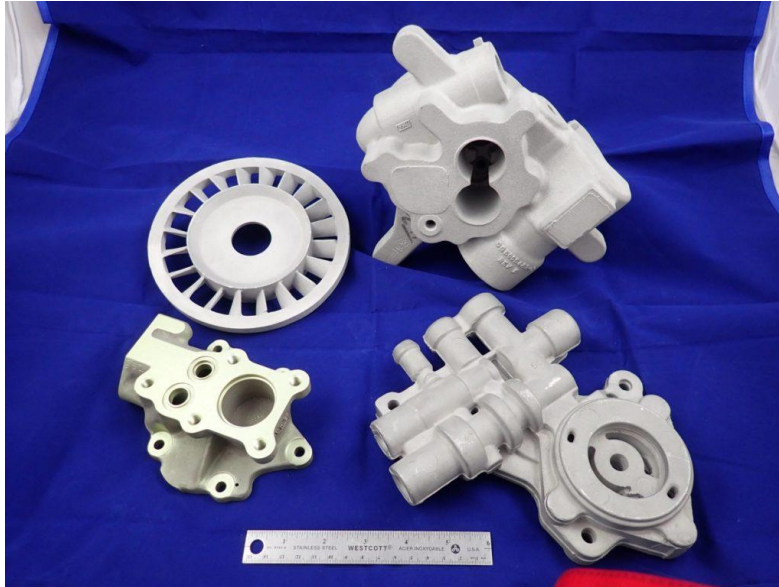


Figure 1. Petites pièces moulées au sable

2. Principes de base en fonderie

La fonderie présente des difficultés inhérentes qui sont maîtrisées par les fondeurs expérimentés pour la production de multiples pièces industrielles. Ces difficultés ont intérêt à être connues des concepteurs et utilisateurs des pièces moulées afin d'adapter la conception et faciliter la production. En fonderie, les principaux points à prendre en compte sont :

- Présence de retrait de solidification et solidification dirigée.
- Forte tendance à l'oxydation de l'aluminium liquide.
- Tendance à la formation de porosité des alliages d'aluminium.
- Transfert de chaleur et contraintes.
- Épaisseurs minimums propres à chaque procédé.

2.1. Retrait et solidification

Le métal liquide jusqu'à la température ambiante se contracte de 3 façons :

- Contraction du liquide
- Contraction à la solidification, l'aluminium étant plus dense à l'état solide
- Contraction thermique du solide après la solidification jusqu'à l'ambiante

Étant donné que le métal cesse habituellement d'être alimenté en métal liquide à la fin de la coulée, on utilise des espaces ajoutés au moulage appelés masselottes qui servent de réservoir d'alimentation en métal liquide jusqu'à la fin de la solidification. S'il y a un manque d'alimentation dans un moulage (habituellement dans une partie massive mal alimentée) il se forme une retassure ou un retrait dispersé à cet endroit. En moulage au sable, et en moule permanent, on tente de terminer la solidification du moulage dans la masselotte ou les canaux d'alimentation, afin de concentrer les défauts de retrait à cet endroit en dirigeant la solidification vers les masselottes. C'est le principe de la solidification dirigée.

Il est possible de modéliser la solidification d'une pièce dans la phase de conception des outillages de fonderie (figure 2).

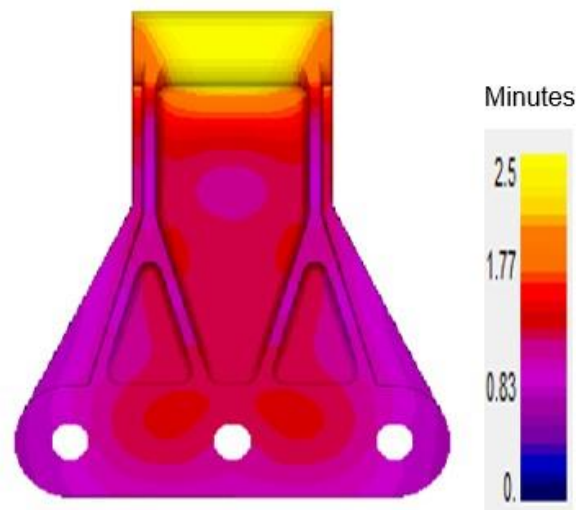


Figure 2. Prédiction par simulation de la séquence de solidification d'une pièce produite en moule permanent basculé.

Pendant la solidification, le moule peut s'opposer au retrait solide ce qui peut causer de la fissuration à chaud, particulièrement dans les moules métalliques.

Certains procédés de fonderie sont moins aptes au masselottage, c'est le cas du moulage en cire perdue où on tente de terminer la solidification dans les canaux d'alimentation ou en moulage sous pression où des sections uniformes sont utilisées pour diriger la solidification vers le centre de la pièce. On utilise des sections minces dans ce dernier cas en partie pour minimiser le retrait.

2.2 Turbulence et oxydation

L'aluminium s'oxyde facilement à l'état liquide. Le métal à fondre se couvre d'une couche d'oxyde mince qui est libérée dans le métal liquide. Le traitement du

métal par dégazage à l'argon et l'usage de flux permettent de faire flotter ces films d'oxyde en surface où ils seront éliminés par écumage.

En fonderie, on tente de remplir les empreintes des moules avec le moins de turbulence possible par le bas (coulée en source). Le système d'alimentation du moule est calculé pour remplir le plus rapidement possible pour éviter la solidification prématurée, mais avec le minimum de turbulence. On ajoute aussi des filtres dans le moule lors de la coulée de pièces critiques structurales (figure 3).



Figure 3. Canal d'alimentation avec filtres et masselotte latérales

La turbulence peut aussi être causée par la forme de la pièce; l'usage de sections uniformes avec de bons rayons de courbures aux changements de direction aide au déplacement du métal liquide. Des pièces trop profondes en moulage permanent pourraient être difficiles à mouler en basculement, si le métal doit tomber brusquement dans l'empreinte.

2.3 Tendance à la formation de porosité des alliages d'aluminium

Malgré la présence d'une bonne solidification dirigée, dans les procédés où le métal se refroidit lentement comme pour le moulage au sable, il reste une certaine porosité inhérente dans les moulages d'aluminium. La porosité peut être aggravée par la présence d'hydrogène dissout dans le bain. L'hydrogène dissout se recompose en hydrogène gazeux à la solidification et agrandit les pores. La fonderie limitera donc le pourcentage de retour pour les produits critiques et procédera à un dégazage du bain liquide au rotor à l'argon avant la coulée

(figure 4). Le moulage en moule métallique est moins marqué par ce phénomène grâce à la solidification rapide.



Figure 4. Dégazage au rotor et porosité évaluée par le test sous pression réduite.

2.4 Transfert de chaleur et contraintes

Après la coulée, la chaleur du métal liquide se transfère au moule et le métal se solidifie progressivement. Chaque procédé permet donc une épaisseur minimale de pièces qui est en fonction du type de moule et de la pression de moulage (voir section 3).

L'usage de congés et arrondis sur le moulage permet de mieux distribuer la chaleur au moule et éviter de surchauffer localement le moule créant un point chaud dans la pièce avec risque de fissuration locale à chaud (figure 5).



Figure 5. Fissuration à chaud du magnésium en moule permanent : les alliages d'aluminium 201 ou 535 sans silicium ont un comportement similaire.

L'usage de congés et arrondis permet au moulage de se déplacer légèrement au moment de l'ouverture du moule ou après la coulée. Dans un moule métallique, cela permet de réduire les contraintes et dans un moule au sable cela distribue les contraintes sur le sable qui se compresse.

3. Capacité des procédés de fonderie

Chaque procédé apporte ses avantages et ses inconvénients; le procédé s'adapte au marché. Les caractéristiques des procédés de moulage pour l'aluminium sont résumées dans les tableaux suivants.

Tableau 1 - Caractéristiques des procédés de moulage reliées à la conception

Procédé	Sable à vert	Sable à prise chimique	Cire perdue	Moule permanent	Sous pression
Alliages d'aluminium disponibles	Tous	Tous	Tous	Série 356 et quelques autres	Alliage recyclés à haut silicium Alliages à bas fer (pour ductilité)
Forme	Toute	Toute	Toute	Forme éjectable dans le sens d'ouverture du moule si possible. Noyau de sable possible	Forme éjectable dans le sens de l'ouverture fortement recommandée
Dimensions typiques	0 à 1 m	0 à 3 m	0 à 0,7 m 0 à 2 m avec durcissement au gaz ammoniac	0 à 1m	0 à 0,7 m
Épaisseur minimum	5 mm	4 mm 2mm en basse pression	2 mm	4 mm	2 mm
Précision dimensionnelle +/- mm	1,6mm par 300 mm	1,3mm par 300mm	0,7mm par 300 mm	1 mm par 300 mm	0,6mm par 300 mm
Fini de surface micropouces RMS et rendu des détails	200-400 Faible à moyen	150-300 Moyen à très bon	60-200 Très bon à excellent	200-420 Bon à très bon	60-125 Très bon à Excellent
Quantité	1 à 3000	1 à 3000	1* à 10 000 *Fonderie d'art	500 à 20 000	10 000 à 200 000

Tableau 2 - Caractéristiques des procédés de moulage reliées au coût et délai de livraison

Procédé	Sable à vert	Sable à prise chimique	Cire perdue	Moule permanent	Sous pression
Prix d'outillage \$	3 000 à 20 000	3 000 à 20 000	4 000 à 25 000	5 000 à 40 000	Plus de 25 000
Prix des équipements de moulage	Bas à moyen	Bas à moyen	Moyen	Moyen	Élevé
Prix des équipements de préparation du sable	Moyen à élevé	Moyen à élevé	Moyen (inclus dans le prix du sable)	Sans objet	Sans objet
Coût de main-d'oeuvre pour le moulage	Moyen	Moyen	Élevé	Faible	Très faible
Coût de finition	Moyen à élevé	Moyen à élevé	Faible à moyen	Faible à moyen	Faible
Habilité manuelle du mouleur	Requise	Requise	Requise	Moyennement requise	Peu requise
Délai de livraison	3-6 semaines	3-6 semaines	4-8 semaines	1-2 mois	1 à 4 mois

4. Assurance qualité

Le moulage de l'aluminium est un procédé de production efficace et performant qui mérite sérieusement la peine d'être envisagé. Une fonderie maîtrisant les règles de l'art fournira des pièces pouvant supporter les requis de service. Il faut tenir compte de la possibilité de problèmes ponctuels pouvant survenir en production et pour cette raison, les concepteurs utilisent la notion de facteur de sécurité.

$$\text{Eq 1 : } FS = Re_{\text{typ}}/Re_{\text{des}}$$

Où Re_{typ} = limite élastique typique de l'alliage choisi et Re_{des} = limite élastique de conception

La mise en fabrication en fonderie s'accompagne d'un plan d'inspection qualité pour :

- La période de développement (échantillons ou premiers articles)
- La période des premières productions
- Les séries de production

Ce programme est composé d'un ou de tous les essais suivants :

- Analyses chimiques (habituellement fait de facto par la fonderie)
- Inspection visuelle totale ou locale (habituellement fait de facto par la fonderie qui applique des critères généraux qui font sa marque de commerce et parfois après discussion lors des premières productions ou selon un devis ou une norme)
- Essais de traction sur les barreaux coulés à part, coulés avec les pièces ou excisés dans les pièces
- Essais non destructifs par ressuage (liquide pénétrant) et/ou radiographie; des normes d'acceptabilité doivent être spécifiées (par exemple ASTM).

Les essais dans la phase de prototypage ont pour but de valider la méthode de moulage, ceux en première production pour vérifier les variations possibles du procédé et finalement ceux en production de série pour accepter chaque série. Le processus d'approvisionnement peut aussi inclure les essais statistiques, un plan de mise en œuvre et autres activités d'assurance qualité.

Par exemple, pour des pièces commerciales non sollicitées on effectuera le minimum de contrôles tandis que pour des pièces d'avionnerie sollicitées une inspection radiographique à 100 % sera demandée en plus de tous les contrôles énumérés plus haut. Pour les pièces du secteur automobile, on demandera des mesures de capacité de procédés et des essais jusqu'aux productions de séries et, dans les cas extrêmes, des radiographies sur un échantillon du lot pour les productions de série.

Un plan d'inspection élaboré permet d'utiliser un facteur de sécurité s'approchant de 1, car la capacité des procédés de moulage est connue et documentée. Il est important de comprendre qu'un coût est associé à toute activité d'assurance qualité; elle induit aussi des délais de production qui peuvent affecter l'attitude de l'acheteur de pièces moulées dans le marché. Le choix dépendra donc du risque et du marché.

Références

- AFS Aluminum casting technology 3rd edition American Foundry Society Schaumburg Il 2017
- ASM Handbook Volume 15 Casting, ASM International, Metals park Oh 1998
- Technique de l'ingénieur, Tableaux comparatif sur les principaux procédés de moulage M750,3-1