



Moulage en cire perdue

Guy Morin ing.
Centre de Métallurgie du Québec

16 avril 2019

LE MOULAGE EN CIRE PERDUE

Auteur : Guy Morin, ing.

1. Introduction

Le moulage en cire perdue est un procédé de moulage à modèle perdu. On utilise un outillage permanent pour produire les modèles. Les modèles sont montés en grappes et enrobés de couches successives de coulis recouvert de stucco et séchés entre chaque couche. La cire est ensuite évacuée dans un autoclave ou dans un four, puis le moule est cuit. Le moule carapace ainsi obtenu est préchauffé pour la coulée à une température aussi proche que voulue de la température de coulée ce qui permet d'obtenir des parois très minces.

On distingue deux variantes du procédé :

- Le moulage en cire perdue de précision de type industriel où des matrices en aluminium sont utilisées pour produire les modèles
- Le moulage en cire perdue d'art où on utilise des cires sculptées ou moulées dans des moules en silicone ou d'autres matières.

On peut aussi utiliser des modèles produits par impression 3D.

1.1 Avantages et capacités du moulage en cire perdue

Le moulage en cire perdue offre la meilleure précision dimensionnelle parmi les procédés de moulage de l'aluminium (avec le moulage sous pression – *die casting*). Les détails fins peuvent être moulés, le fini de surface est excellent et la majorité des détails fonctionnels peuvent être moulés sans besoin d'usinage (figure 1). La liberté de conception est très large grâce à l'utilisation de noyaux en aluminium démontables dans les moules d'injection. Le noyautage se fait naturellement par la pénétration des coulis et des stuccos dans les cavités.

Le procédé est aussi caractérisé par l'obtention de formes et de détails qui ressemblent parfois à de l'usinage sans angles de dépouille et sans plan de joint. Les tolérances dimensionnelles liées au plan de joint sont incluses au modèle. L'usage de rayons sur les moulages est quand même recommandé.

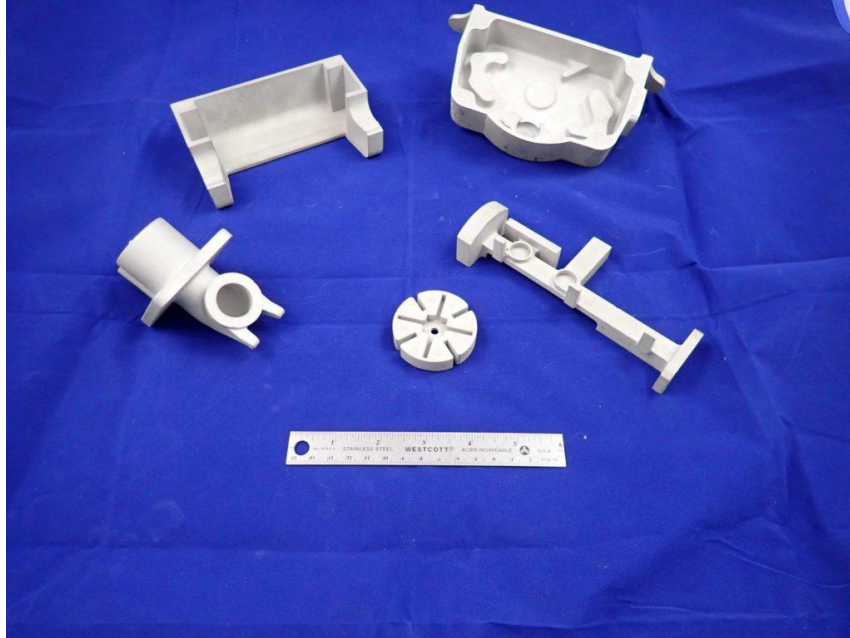


Figure 1. Pièces réalisées par moulage en cire perdue

L'usage de moules préchauffés à haute température ralentit la solidification ce qui abaisse un peu les propriétés mécaniques par rapport à celles possibles en moule permanent, mais la relative absence d'inclusion provenant du moule céramique donne de bons allongements à la rupture. Les alliages résistants comme ceux de la série 200 peuvent être moulés à condition de prévoir des ajustements à la conception pour limiter le phénomène de fissuration à chaud.

Le nombre d'étapes du procédé rend ce procédé plus onéreux que les autres procédés de moulage. Ce désavantage est mitigé dans le cas de pièces complexes lorsqu'une seule pièce moulée avec plusieurs détails fonctionnels peut remplacer une combinaison de pièces assemblées. Le moulage de parois minces en trois dimensions rendu possible par ce procédé intéresse aussi le marché de l'aéronautique pour l'allègement des pièces.

1.2 Marchés du moulage de précision en cire perdue

En résumé, le procédé offre les caractéristiques suivantes :

- Tolérances dimensionnelles exceptionnelles, très bon fini de surface, absence de plan de joint. Rendu des détails exceptionnels.
- Usinage minimum requis après le moulage (habituellement seulement les filets et surface d'assemblage).
- Pièces simples à complexes avec le plus grand degré de liberté en fonderie et un certain degré de liberté au niveau des alliages. Pièces minces 2 mm possible dans certaines parties.
- Optimisé pour les faibles à moyennes séries.

- Prix plus élevé.

Le marché du moulage de précision est concentré sur les pièces aéronautiques et du transport terrestre (sauf automobile dû aux quantités). On retrouve aussi des pièces de télécommunication ou boîtiers avec détails fonctionnels (insertions de cartes électroniques et présence d'ailettes pour dissiper la chaleur).

2. Étapes du procédé

Le fondeur est responsable de :

- La fabrication de la matrice d'injection surtout l'ajout des retraits combinés cire-métal.
- L'ajustement final des dimensions du moule d'injection après la première production d'échantillons.
- La conception des grappes
- La production des moulages

Les figures suivantes montrent les étapes du procédé de fabrication d'un moule en cire perdue. Dans le cas de l'aluminium, la coulée en source par remontée dans des canaux secondaires comme montrés sur la figure 2 est recommandée afin de limiter la turbulence et l'oxydation du métal. Les étapes de fabrication pour un moule pour l'aluminium sont les mêmes.

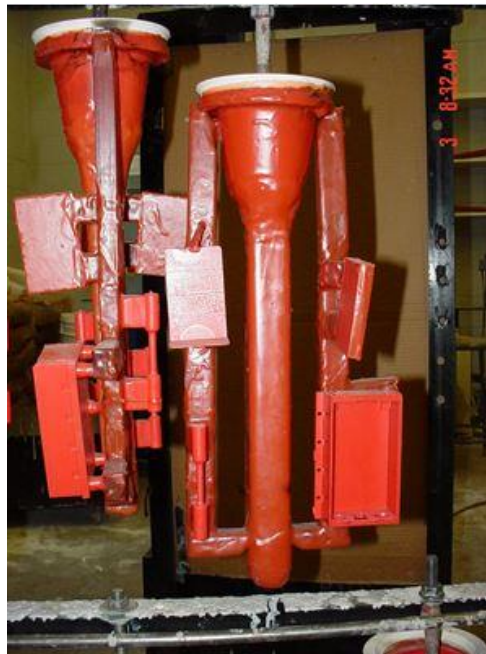


Figure 2. Montage en grappe de diverses pièces expérimentales pour coulée en aluminium

2.1 Injection des modèles

Les modèles sont injectés dans des matrices en aluminium (figure 3). Ces matrices sont corrigées après la première production afin d'obtenir les dimensions désirées. Par la suite, les dimensions resteront identiques et la vie du moule est quasi illimitée. Les moules sont usinés par électro usinage ce qui permet un excellent fini de surface. Les moules les plus simples sont constitués de deux parties. Afin de mouler des détails plus complexes, on peut utiliser des noyaux métalliques insérés dans le moule ou des parties extérieures démontables. Cela permet d'obtenir des angles de dépouilles de zéro degré. Les noyaux internes peuvent être faits de parties démontables pour mouler des cavités fermées qui ne pourraient pas être moulées par extraction directe du noyau. Le moule d'injection appartient au client.

Les moules d'injection sont montés sur une presse avec un cylindre d'injection qui s'alimente directement dans un réservoir de cire liquide. Les moules peuvent aussi être mécanisés pour extraction de noyaux et refroidis à l'eau. Des moules à multicavités sont utilisés si le nombre de pièces à produire est élevé. Les cires d'injection contiennent des polymères pour diminuer la tendance au retrait de la cire dans les moules d'injection.

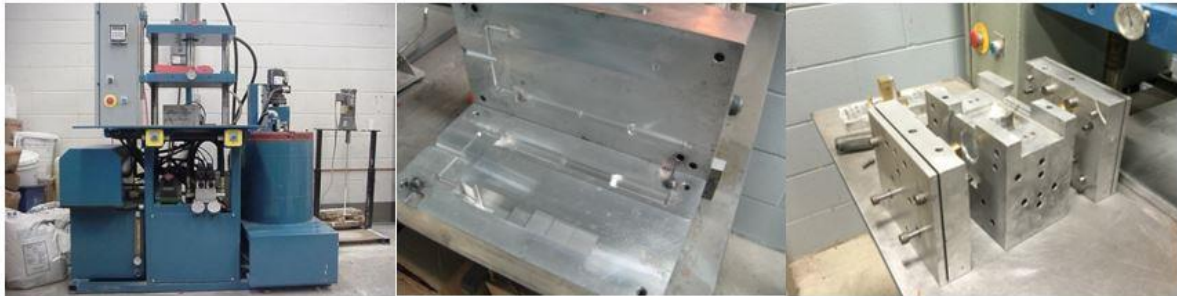


Figure 3. Presse d'injection des modèles et moules d'injection.

2.2 Montage en grappe

Les modèles sont montés en grappe (figure 4) en vue de l'enrobage. Le montage tient compte des points suivants :

- Alimentation avec turbulence limitée
- Solidification dirigée vers les canaux et la descente de coulée qui sert de masselotte
- Évacuation de la cire (en position renversée) et de l'air (en position de coulée)
- Facilité de l'enrobage accès aux trous et au lettrage
- Facilité de la coupe des pièces sur la grappe coulée
- Prix de revient par grappe.



Figure 4. Montage en grappe (ici montage pour titane coulé en chute)

2.3 Enrobage

L'enrobage de la grappe suit le montage. La grappe est immergée dans un coulis puis est saupoudrée de stucco pour renforcer la couche de coulis (figure 5). Les étapes sont répétées plusieurs fois avec séchage entre chaque couche. Les coulis sont composés d'un liant de silice colloïdale renforcé de polymères de type latex et de poudres réfractaires (slice fondue, aluminosilicate). Les coulis sont maintenus en suspension en permanence dans des réservoirs rotatifs. Les stuccos de granulométries plus grossières sont faits des même réfractaires et sont appliqués avec dans des sableurs par gravité. L'opération est robotisée; les moules circulent dans l'atelier sur un convoyeur pour le séchage.

Les coulis pour les couches primaires sont plus visqueux que ceux utilisés pour les couches secondaires. Les stuccos utilisés pour couches secondaires sont plus grossiers que ceux des couches primaires afin de bâtir rapidement la carapace (6 à 8mm d'épaisseur) de moule une fois les détails fins enrobés.

Il existe divers types de liants pour fabriquer les coulis. Les liants à la silice colloïdale sèchent naturellement après 4 à 8 heures selon la configuration de la pièce en formant des gels de silice qui retiennent la poudre réfractaire du coulis et du stucco. D'autres types de liant forment des gels de silice en présence de gaz ammoniac ce qui permet la formation de moule carapace de grandes dimensions (1 à 2 mètres) et plus résistantes à vert avant le décarage.



Figure 5. Enrobage par couches successives de coulis et stucco.

2.4 Décirage, cuisson et coulée

Après la séquence d'enrobage, les moules sont décirés en position inversée généralement en autoclave à 160°C. On utilise aussi le décirage au four, surtout en fonderie d'art d'aluminium. Le décirage doit être effectué avec un fort gradient de température dans le but de faire fondre rapidement la cire à l'interface du moule avant que le centre des modèles ne se dilate et cause la fissuration de la carapace. Le décirage au four est meilleur à cet égard, mais sa productivité est limitée. Les moules-carapaces décirés sont ensuite cuits pour éliminer toute présence de cire ou de cendre résiduelle et aussi pour donner une résistance mécanique au moule-carapace. Le moule est préchauffé avant la coulée de métal liquide.

Les moules-carapaces sont toujours coulés en séries à partir d'un bain de métal dégazé et traité.



Figure 6. Coupe d'un moule avant le décirage

2.5 Cassage, coupe, finition et parachèvement

Après la solidification et le refroidissement du métal, les moules sont cassés sommairement, puis la pièce est lavée sous pression. Il importe de ne pas briser les pièces lors de cette opération. Pour cette raison, les épaisseurs des pièces sont limitées à 2 mm, bien que ce soit possible de couler une épaisseur plus mince dans un moule préchauffé à 700°C. Une fois les grappes lavées, on procède au sciage du système d'alimentation et au meulage des attaques de coulée et au jet de sable final. Le fini de surface final est celui du jet de sable soit 125 micro pouces RMS.

Les parachèvements habituellement demandés pour les pièces en aluminium sont :

- Traitement thermique
- Essais non destructifs par ressuage (liquide pénétrant) ou radiographie (le marché de la cire perdue demande ces types d'essais)
- Finition de surface si demandée
- Usinage

En moulage en cire perdue nous notons un gros effort du personnel de la fonderie et de l'assurance qualité aux mesures dimensionnelles.

3. Impression 3D

L'impression 3D des modèles est possible pour les petites séries ou pour le prototypage. Les premiers procédés d'impression 3D, datant de 1990, produisaient des modèles en cire par déposition ou des modèles en résine par réticulation couche par couche. Ces procédés présentaient certains désavantages comme l'impossibilité de faire des sections en porte-à-faux pour la cire déposée impliquant un nettoyage excessif des modèles, ou encore des problèmes d'expansion des résines et la fissuration des carapaces au décirage et la génération de gaz. L'usage de modèles en résine alvéolés permet leur déformation au décirage, mais oblige une inspection pour boucher tous les défauts de surface du modèle avant l'immersion dans le coulis. De nouveaux procédés utilisent des résines PMMA (figure 7) qui se contractent au décirage ce qui permet l'utilisation de modèles pleins sans besoin d'ajouter des événements locaux sur le modèle pour évacuer les gaz (à boucher après le décirage et à meuler après la coupe).

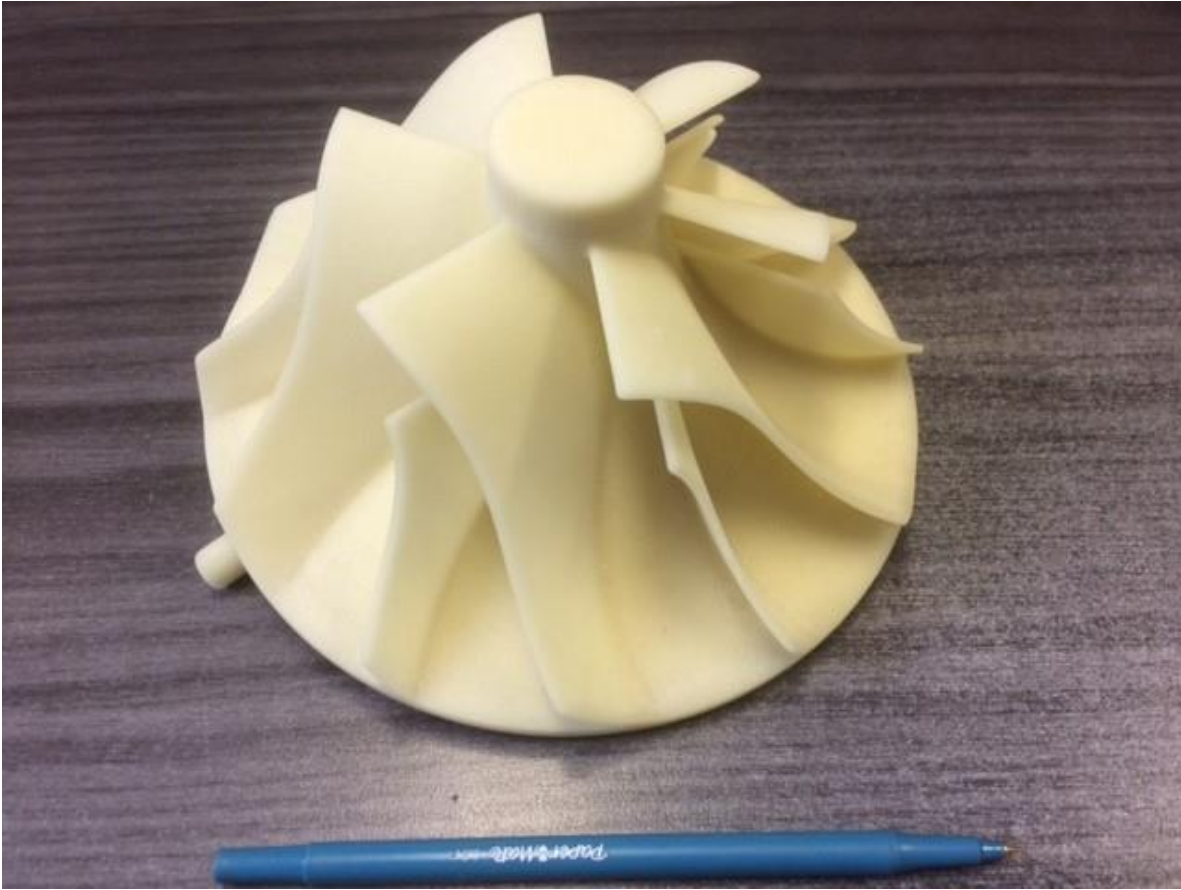


Figure 7. Modèle perdu produit par impression 3D en résine PMMA

L'impression directe du moule ou de la grappe sans passer par le modèle est en développement.

4. La fonderie d'art

En fonderie d'art, le principal changement est la méthode de fabrication du modèle. On peut utiliser directement une cire sculptée ou un modèle produit par impression 3D, mais les artistes préfèrent une matière plus facile à sculpter avec la possibilité de fabriquer un moule réutilisable pour fabriquer plusieurs modèles. Il est à noter que la fonderie d'art en cire perdue date de plus de 3000 ans ce qui est bien antérieur au procédé industriel qui a été développé vers 1940.

Pour fabriquer le moule servant à fabriquer le modèle en cire, on place un modèle maître dans un contenant, souvent une chape de plâtre ou en bois. Du silicone liquide est versé autour du modèle maître dans la chape puis après prise, le silicone est coupé autour du modèle qui est retiré. Le silicone est remis dans la chape qui lui sert de support (figure 8). Les modèles en cire sont moulés en versant de la cire liquide dans l'empreinte en silicone et en les démoulant après la prise de la cire. Le moule est réutilisable.

Le reste du procédé suit les mêmes étapes que pour le procédé industriel décrit précédemment. Si la sculpture dépasse les capacités du procédé, elle sera moulée en diverses parties qui seront soudées par la suite.

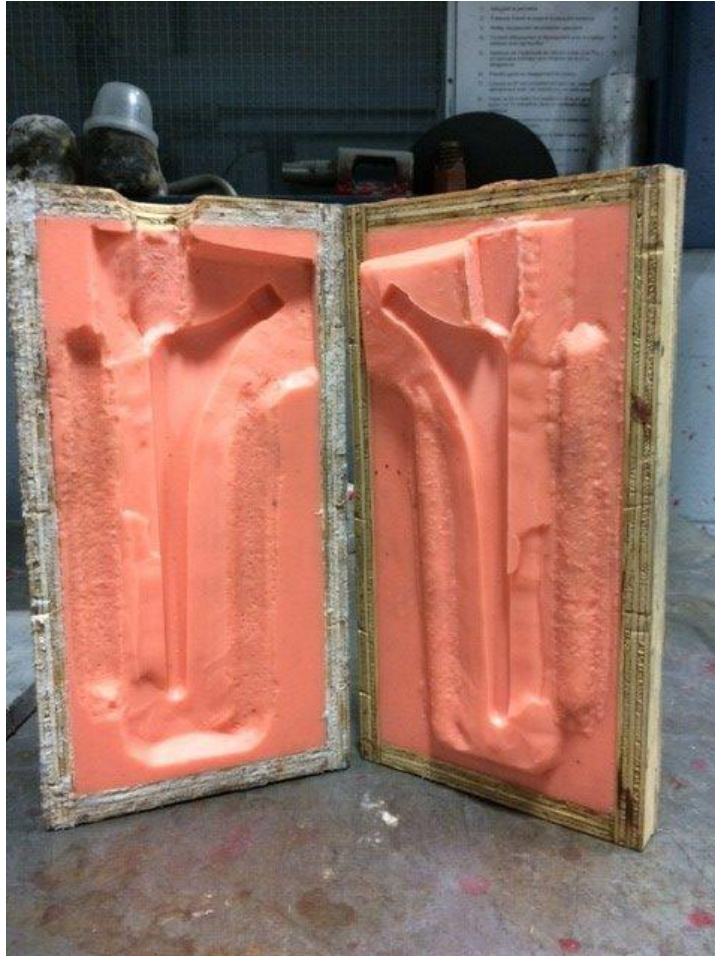


Figure 8. Moule en silicone pour la fabrication de modèles en cire

5. Alliages pour le moulage en cire perdue

Le marché est largement dominé par la série A356 (A356, F357, A357). La présence de silicium est la clef qui permet d'abaisser le point de fusion dans un intervalle allant de 620 à 577°C. Le faible point de fusion combiné à une résistance mécanique faible de l'alliage permet de refermer toute fissure en formation lors de la solidification; l'alliage est peu sujet à la fissuration à chaud. Cet intervalle de solidification combinée à la présence d'hydrogène dissout dans le liquide et un moule préchauffé à 600-700°C favorise la formation de microporosité ce qui peut causer des pertes d'étanchéité et la baisse des propriétés mécaniques. La fonderie effectue donc un dégazage au rotor avec argon pour capter l'hydrogène dissout et l'évacuer du bain de fusion avant la coulée d'une série de moules. Les alliages A356 peuvent se traiter thermiquement à l'état T6 pour les propriétés maximales ou à l'état T5 pour

obtenir un compromis entre propriétés mécaniques et la déformation à la trempe pour les pièces minces. L'alliage offre une bonne soudabilité ce qui permet le soudage de réparation. Les pièces sont généralement utilisées non peintes ou peintes; l'anodisation sortira de couleur grise à cause du silicium.

Les autres alliages moulés en cire perdue sont: le 535 utilisé pour des pièces résistantes à la corrosion marine, les alliages de la série 700 qui répondent bien au brasage et plus rarement les alliages plus résistants de la série 200. Mis à part la série 356, les alliages sont difficiles à couler ce qui s'accompagne de coûts additionnels. Le tableau 1 donne la liste des principaux alliages moulés en cire perdue. La liste complète des alliages, une description des propriétés mécaniques et une classification complète des caractéristiques comme : résistance à la corrosion, usinabilité et aptitude aux traitements de surface sont disponibles dans la norme ASTM B618.

En ce qui concerne les alliages du tableau 1, les valeurs sont données pour les pièces moulées (alliage XXX.0) pour les barreaux tirés à part. De bonnes pratiques de fonderie ou des recettes maison respectant les teneurs ASTM permettent souvent le dépassement de valeurs spécifiées par 5 à 10 %.

Tableau 1 - Principaux alliages pour le moulage au sable

Alliages et état	Propriétés mécaniques selon ASTM B618 pour les barreaux à part			Commentaire et utilisation
	Résistance mécanique MPa	Limite élastique MPa	A %	
A356.0 T6	235	165	3,5	Alliage d'usage général. À l'état durci, il offre le coût minimum et les propriétés mécaniques les meilleures.
F357.0 T6*	289	220	3	Variante à bas fer du A357 sans béryllium. Valeurs typiques indiquées.
A319.0 F	160	90	1,5	Alliage de résistance moyenne qui conserve ses propriétés mécaniques à chaud à coût minimum. Il peut se traiter thermiquement à l'état T5 et T6.
A319.0 T6	215	140	1.5	
C355.0 T5	250	170	2.5	Alliage de résistance légèrement supérieure au 356, il contient un peu de cuivre qui permet de conserver ses propriétés mécaniques à chaud.
535.0 F	240	125	8	Alliage pour applications maritimes contient 7 % de magnésium, le bain de fusion est plus difficile à traiter et il est sensible à la formation d'oxydes à la coulée. L'alliage présente des difficultés au niveau de la fissuration à chaud, l'étanchéité et la soudabilité.
713.0 T5	220	150	3	L'alliage utilisé pour des pièces minces, car la trempe est évitée. Cet alliage présente des difficultés au niveau de l'étanchéité des pièces et leur soudabilité. Il s'usine très bien, peut se braser et répond bien aux traitements de surface d'anodisation ou de conversion chimique.
201.0 T7	415	345	3	Alliages les plus résistants, mais difficiles à mouler dû leur tendance à la fissuration à chaud. Utilisé surtout en aérospatiale et pour des pièces de machinerie. Leur résistance à la corrosion est la plus faible.

6. Fonderies québécoises offrant les procédés de moulage en cire perdue

Entreprise	Site Internet	Localisation
Alphacasting	https://www.alphacasting.com	Montréal
Moulages Hownet Laval	https://www.arconic.com	Laval
Shellcast Inc.	www.shellcast.com	Montréal
Vestshell	www.vestshell.com	Montréal
Atelier du bronze-Inc. (Fonderie d'art)	www.atelierdubronze.com	Inverness
La Fonderie d'Art d'Inverness Inc & Galerie Anne Renard	fonderieart.com	Inverness

Références

- *AFS Aluminum casting technology 3rd edition American Foundry Society Schaumburg Il 2017*
- *ASM Handbook Volume 15 Casting, ASM International, Metals park Oh 1998*
- *ASTM B26/B26M-14 Standard Specification for Aluminum-Alloy Sand Casting, ASTM International bar Harbour, PA 2014*
- *Beeley P.R. Investment casting, The Institute of materials 1995, 486*