

10 PROCÉDÉS DE MOULAGE

1. Généralités	307
1.1 Procédés de moulage	308
1.2 Traitements thermiques des pièces métalliques moulées	310
1.3 Surépaisseur d'usinage	312
1.4 Tolérances dimensionnelles de moulage	313
1.5 État de surface	315
1.6 Conception des pièces moulées	315
2. Moulage en moule non permanent	318
2.1 Généralités	318
2.2 Moulage au trousseau	319
2.3 Moulage en carcasse ou squelette	319
2.4 Moulage avec modèle bois	319
2.5 Moulage avec plaque-modèle métallique	321
2.6 Moulage en carapace	322
2.7 Moulage céramique, au plâtre, avec élastomère	323
2.8 Moulage à la cire perdue	325
2.9 Moulage avec modèle gazéifiable	325
2.10 Moulage par centrifugation	326
2.11 Moulage V process	327
2.12 Moulage par impact (de Sté Georges Fischer + GF +)	328
2.13 Inserts métalliques	328
2.14 Appareillages de moulage non permanent	329
2.15 Machines à mouler les noyaux	330
2.16 Machines à mouler	331

3.	Moulage en moule permanent	332
3.1	Généralités	332
3.2	Moulage en coquille par gravité	332
3.3	Moulage sous haute pression	337
3.4	Moulage sous basse pression	341
3.5	Moulage en contre-pression	344
3.6	Moulage en centrifugation	345
4.	Moulage par compression des poudres et frittage	348
4.1	Généralités	348
4.2	Poudres métalliques	348
4.3	Caractéristiques des pièces	349
4.4	Conception des pièces frittées	350
4.5	Mise en œuvre	351
4.6	Outillage	354
4.7	Machines	356
4.8	Pièces obtenues	356

1. Généralités

Obtention de pièces métalliques et plastiques, de formes, dimensions et poids très divers, par remplissage d'un moule avec le matériau de la pièce à obtenir rendu liquide (alliages métalliques) ou en poudre et granulés (plastiques, métaux et alliages métalliques) (fig. 10.1).

Moules non permanents					
Fontes	Aciers	Alliages d'aluminium	Alliages de cuivre	Alliages de magnésium	Alliages de zinc
≅ 20 kg à 300 t	≅ 20 kg à 300 t	quelques kg à 3 t	quelques kg à 50 t	quelques kg à 50 kg	≅ 20 kg à 100 kg

Moules permanents					
Fontes	Aciers	Alliages d'aluminium	Alliages de cuivre	Alliages de magnésium	Alliages de zinc
≅ 100 kg à 10 t	≅ 20 kg à 10 t	quelques grammes à 50 kg	quelques kg à 10 t	≅ 10 kg à 30 kg	≅ 10 kg à 50 kg

FIGURE 10.1

Poids approximatifs des pièces produites en moulage (tous procédés confondus).

La pièce est démoulée après solidification du matériau dans le moule (refroidissement des alliages métalliques, compression des poudres métalliques, solidification des plastiques) Forme et résistance définitives de la pièce sont obtenues après refroidissement ou frittage, selon les procédés de mise en œuvre.

Choix du procédé

En fonction du matériau et de son état pour le moulage (poudre, granulés, liquéfié) conditionnant la quantité à produire et le type d'outillage à utiliser (moules permanents ou destructibles).

Pièces obtenues

Métalliques (procédés de fonderie)

Pièces d'un gramme à plusieurs centaines de tonnes (jusqu'à trois cents tonnes).

Épaisseurs minimales coulées : selon le procédé et le matériau utilisé, de quelques mm en coulée au sable à quelques dixièmes de mm en coulée en coquille.

Les pièces creuses (carters...), sont facilement réalisables par l'adjonction de noyaux dans l'empreinte du moule.

Production de la pièce unitaire à la série illimitée avec des procédés adaptés à la quantité à produire et à la qualité à obtenir.

Plastiques (procédé de plasturgie)

Pièces de très petites dimensions (et faible poids) coulées en grappe, à de grandes dimensions. Épaisseur de quelques centièmes de mm à quelques mm.

La production est essentiellement de série (généralement « illimitée ») en moules métalliques (automatisés).

1.1 Procédés de moulage

Moulage en moules non permanents

Des alliages métalliques rendus liquides, dans les empreintes de moule, en sable.

Moules en sable

Utilisables pour une pièce : détruits après solidification du matériau.

Moulage de pièces avec tous les métaux et alliages métalliques (fontes, aciers, alliages de cuivre, d'aluminium, de zinc).

La forme de l'empreinte dans le moule est réalisée différemment selon les dimensions de la pièce ainsi que la quantité à produire.

Moulage au trousseau

Production de grandes pièces, en production unitaire par reproduction de la pièce dans le sable à l'aide d'un gabarit : moulage manuel.

Moulage en carcasse ou squelette

Production de grandes pièces (plusieurs mètres), en production unitaire, à partir d'une structure en bois : travaux manuels.

Moulage et conception du modèle (modelage) manuels.

Moulage avec modèle en bois

Production unitaire et de petites séries : moulage manuel ou à la machine.

Dureté du bois de modèle : en fonction de la série à produire (stabilité à l'usage).

Moulage avec plaque-modèle métallique

Production de petite à grande série (fig. 10.2)

Modèles. En bois, résines, métalliques, selon l'importance de la série : à fixer sur plaques métalliques.

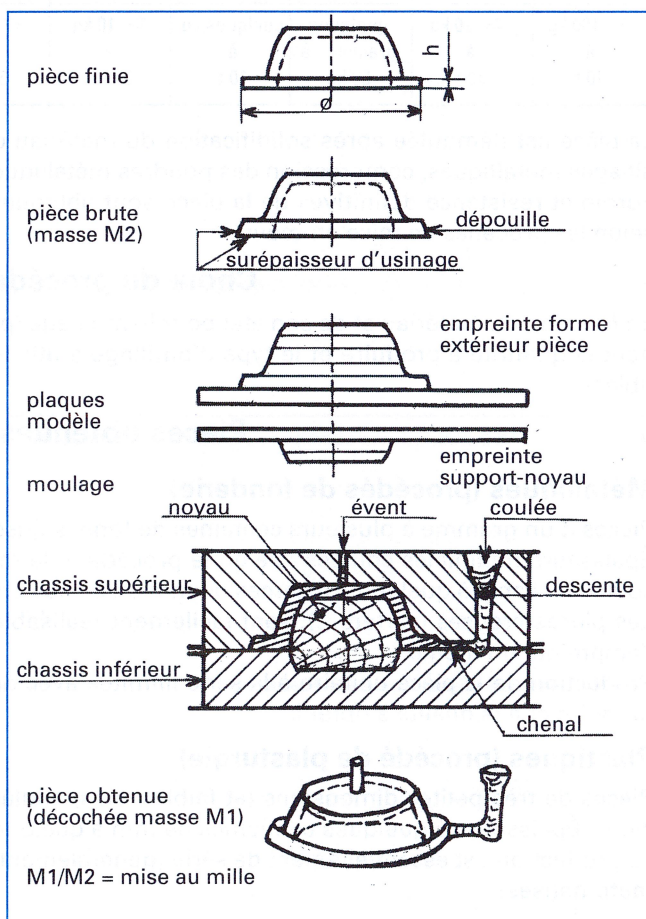


FIGURE 10.2

Schéma du processus de moulage en moule non permanent (avec plaque-modèle).

Moulage en carapace ou procédé Croning

Avec modèle d'épaisseur réduite, en sable et résines thermodurcies : production de pièces précises.

Moulages au plâtre et en céramique

Avec modèle enrobé de plâtre ou de céramique : production de pièces d'excellent état de surface.

Moulage à la cire perdue

Avec modèle perdu (généralement en cire) qui est détruit comme le moule : production de pièces complexes, précises et de petites dimensions.

Moulage à modèle gazéifiable

Modèle généralement en polystyrène, détruit comme le moule : production unitaire.

Moulage par centrifugation

Le moule est animé en rotation durant la coulée : production de type cylindrique.

Moulage V process

Le moule en sable à sec et sans liant est durci sous vide : production de pièces précises (forme, dimensions, état de surface) à partir de petites séries.

Moulage par impact

Le moule en sable est durci par onde de choc : production en série de pièces moyennes d'excellente qualité et avec optimisation.

Le moulage en moules permanents

Des alliages métalliques et des matières plastiques dans des empreintes de moules métalliques.

Moules métalliques

Utilisables jusqu'à leur usure totale, dans les limites de précision des pièces à produire.

La forme de l'empreinte est usinée dans des blocs métalliques constituant le moule (mécanisé ou automatisé selon l'importance des séries) (fig. 10.3).

Production de pièces aux caractéristiques mécaniques supérieures au moulage en sable : la dureté Brinell augmente de 5 à 8 % et la charge à la rupture de 10 à 12 %. Le moulage s'effectue suivant plusieurs méthodes, optimisant qualité (dimensionnelle, forme, métallurgique) avec productivité.

Moulage en coquille, par gravité

Le métal en fusion remplit l'empreinte du moule par la pesanteur : production en série.

Moulage sous haute pression

Injection sous haute pression de l'alliage en fusion dans l'empreinte : production de grande série avec des outillages entièrement automatisés.

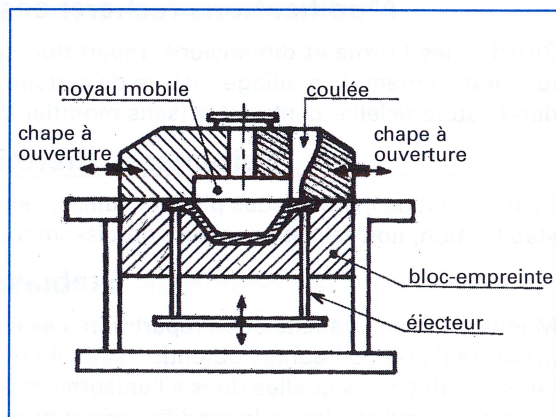


FIGURE 10.3 Schéma de principe du moulage permanent (par gravité en petite série).

Moulage en basse pression

Injection sous une basse pression de l'alliage en fusion dans l'empreinte : production automatisée de pièces, particulièrement en alliages d'aluminium et de cuivre.

Moulage en contre-pression

Injection de l'alliage en fusion dans l'empreinte, sous basse pression avec une contre-pression dans l'empreinte : production automatisée de pièces diverses de haute qualité, en tous matériaux coulables.

Moulage par centrifugation

Injection de l'alliage en fusion dans l'empreinte sous une forte accélération de l'alliage (à forte masse volumique) : production de pièces cylindriques en particulier, en mono, bi ou multi-métaux.

Moulage par frittage

Nécessite, préalablement au frittage de la pièce, le moulage de cette pièce par compression d'une poudre métallique, dans un moule permanent : production de pièces spécifiques (poreuses) en grande série, avec précision (produit fini ou semi-ouvré).

1.2 Traitements thermiques des pièces métalliques moulées

Différents traitements thermiques peuvent être effectués sur les pièces obtenues par moulage. Le traitement thermique approprié, total ou partiel, est fonction du matériau constitutif de la pièce et de son utilisation.

Modifications recherchées sur les pièces coulées

Structurales (forme et dimensions, répartition des constituants sans en modifier la nature) ; teneur d'élément d'un alliage ; nature de certains constituants ; dureté superficielle ; contraintes (sans modifier la nature des constituants).

Traitements thermiques appliqués

Pour un état de livraison des pièces coulées, selon les matériaux constitutifs : stabilisation, normalisation, recuit, durcissement, malléabilisation, trempe et revenu.

Stabilisation

Modification en intensité et en répartition. Les contraintes internes de la pièce, sans modifier la nature des constituants : obtention stabilité géométrique et structurale.

Les contraintes résiduelles dues à l'anisothermie durant la solidification et le refroidissement de la pièce, qui tendent à la modifier géométriquement, sont réduites par ce traitement thermique, avec obtention d'un état physico-chimique stable du matériau.

Traitement (aciers, fontes)

Chauffe de la pièce jusqu'à 300 °C minimum (température de fluage des zones sous contraintes, sans modification de la nature des constituants).

Maintien en température durant un temps déterminé (selon le matériau, le volume et la forme de la pièce).

Refroidissement à une vitesse donnée jusqu'à une température définie.

Matériaux stabilisés

Aciers, fontes grises, alliages d'aluminium et de magnésium.

Aciers. Pièces soumises à de fortes sollicitations (engrenages...) ou à des chocs thermiques (moteurs à explosion, outillages...).

Fontes. Grises, martensitiques, bainitiques : pièces volumineuses et devant avoir une grande stabilité à l'usage (éléments de machines...).

Alliages d'aluminium

Ne devant pas subir un traitement thermique de durcissement pour pièces devant être usinées (enlèvement de matière libérant les contraintes résiduelles de moulage, pièces devant être utilisées dans des conditions sévères (pistons de moteurs à explosions...).

Traitement. Chauffe de la pièce entre 150 et 350 °C durant quelques heures (2 à 10 heures, selon les dimensions de la pièce ; refroidissement lent (dans le four de chauffe).

Certains alliages de magnésium

Pièces devant être usinées :

Traitement. Chauffe de la pièce à 200 °C durant 15 à 20 heures ; refroidissement lent (dans le four de chauffe).

Normalisation

Homogénéisation des structures perlitiques des aciers et des fontes : obtention d'une structure bien définie.

Matériaux stabilisés

Aciers au carbone ou faiblement alliés. Pièces devant avoir une structure perlitique fine.

Aciers à faible teneur en carbone. Pièces devant avoir une structure bainitique ou martensitique.

Fontes. Pièces devant avoir une réduction de la ferrite libre.

Traitement : chauffe de la pièce entre 800 et 930 °C, puis trempe à l'air.

Recuit

Diminution de la dureté pour abaisser la quantité de carbures libres ou de perlite des pièces coulées, en fonte et en acier : affine et uniformise le grain du matériau.

Matériaux recuits : fontes, aciers

Le carbone est précipité à l'état de graphite.

Traitement. Chauffe de la pièce entre 900 °C et 1050 °C durant 1 à 3 heures ; refroidissement lent (dans le four de chauffe ou à l'air).

Recuit de détente. Traitement de stabilisation : chauffe de la pièce entre 600 °C et 750 °C durant 1 à 2 heures ; refroidissement lent (dans le four de chauffe).

Durcissement

Augmentation de la dureté, de la charge à la rupture, et en particulier de la limite élastique avec équilibre de la solution solide.

Matériaux durcis : aluminium et ses alliages

Traitement. Homogénéisation, trempe et durcissement du matériau : chauffe de la pièce entre 450 °C et 600 °C, durant plusieurs heures (6 à 15 heures, selon les pièces) ; trempe par refroidissement rapide (à l'eau) produisant une solution solide homogène, mais instable ; revenu, par maintien de la pièce à environ 200 °C durant plusieurs heures (5 à 15 heures, selon les pièces) : durcissement structural avec équilibre de la solution solide.

Durcissement par maturation. Après trempe, faire séjourner la pièce quelques jours (4 à 5) à température ambiante ($\cong 20^\circ$) : vieillissement naturel.

Malléabilisation

Obtention de structures bien définies. Répondre à une utilisation, faciliter un usinage ultérieur.

Matériaux malléabilisés - fontes

Selon le traitement appliqué, la fonte malléabilisée sera à « cœur blanc » dite Européenne, à graphite nodulaire ferritique (à « cœur noir », dite Américaine) ou à graphite nodulaire perlitique.

Fonte à cœur blanc

Obtenu en décarburant le matériau, par chauffe de la pièce à $1\,000^\circ\text{C}$, en atmosphère contrôlée d'oxyde de carbone, durant 50 à 100 heures (selon la pièce) ; refroidissement très lent ($\cong 10^\circ\text{C}$ par heure) jusqu'à 650°C et refroidissement final plus rapide ($\cong 30^\circ\text{C}$ par heure).

Fonte à cœur noir

Obtenu en graphitisant le matériau (le carbone précipite à l'état de graphite) par chauffe de 800 à 900°C durant 10 à 20 heures ; refroidissement très lent ($\cong 3^\circ\text{C}$ par heure) jusqu'à 650°C et refroidissement final rapide.

Fonte à graphite nodulaire perlitique

Obtenu par une double trempe et un revenu de la pièce : chauffe à $1\,000^\circ\text{C}$ durant 10 à 15 heures et trempe à l'air ; chauffe à 800°C durant quelques heures (3 à 4) et trempe à l'huile ; revenu à 650°C .

Pièces moulées en aluminium et ses alliages

Peuvent être livrées avec des traitements thermiques spécifiés, tels que recuit, stabilisation, trempe et revenu, trempe et maturation, trempe et stabilisation.

La normalisation (NF A 02-002) codifie ces états de livraison (0 à 9) ainsi que le mode d'obtention en moulage (Y0 à Y9).

1.3

Surépaisseur d'usinage

Surépaisseur de matière sur les surfaces fonctionnelles à usiner (coupe, abrasion).

À prévoir sur les dessins de définition du produit brut (ordre d'exécution donné au fondeur).

Elles varient selon : dimensions et forme des pièces ; classe des tolérances dimensionnelles ; procédé de moulage.

Normalisées pour la fonte grise non alliée et les aciers coulés en sable (fig. 10.4).

Surfaces brutes de départ de cotation du produit fini

Sauf convention demandeur/fondeur, réduire la surépaisseur d'usinage à 2 mm pour pièces de plus grande dimension ≤ 250 mm ; 3 mm au-delà.

Surépaisseurs non normalisées

Elles varient selon le procédé de moulage et les dimensions de la pièce. On admet :

– Fontes alliées et spéciales : identique à fonte grise ; alliages d'aluminium : 0,8 mm minimum ; alliages de cuivre : 1,2 mm minimum ; alliages de zinc : 0,2 à 0,5 mm.

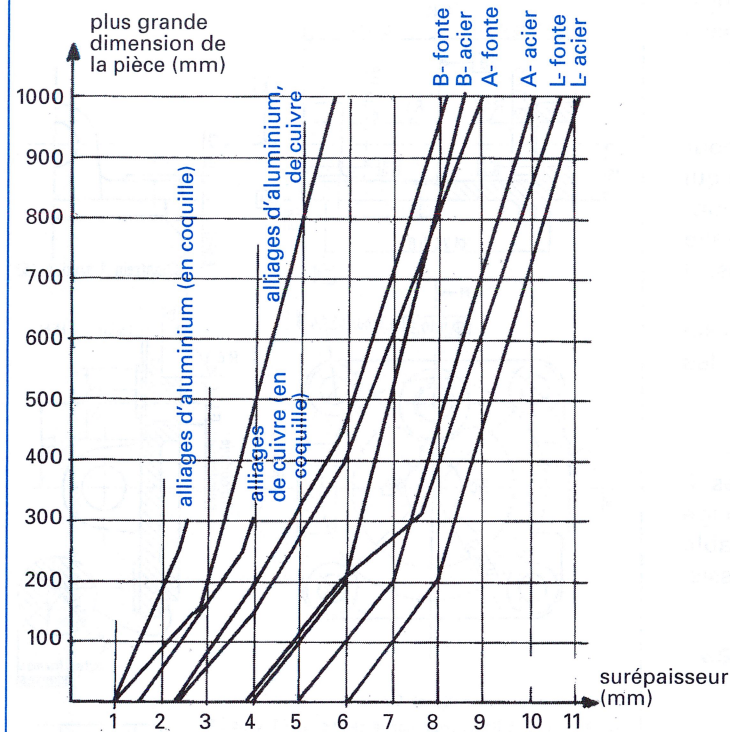


FIGURE 10.4

Ordre de grandeur des surépaisseurs d'usinage en moulage au sable (classes de tolérances A, B, L).

Nota : Simplification d'un modèle en production de petite série : augmenter la surépaisseur d'une surface (obtention d'un joint plan...).

10

1.4 Tolérances dimensionnelles de moulage

Elles sont définies par des classes de précision du produit fini (produit brut).

Normalisées pour fonte grise non alliée et aciers : classes L, A, B, P.

La référence de précision est donnée par la plus grande dimension D de la pièce.

Classes de tolérances

Classe de tolérances L

Pour les cotes du produit fini non tolérancées.

Classe de tolérances A

Pour les cotes tolérancées du produit fini, le moulage de la pièce est effectué avec modèle bois.

Classe de tolérances B

Pour les cotes tolérancées du produit fini, avec moulage de la pièce effectué en modèle métallique.

Classe de tolérances P

Associée aux classes L, A, B, pour les cotes de forme de la pièce qui ne seront pas usinées et répondent à une fonction conceptuelle (parois, nervures, bossages...) (fig. 10.6).

Cette tolérance peut être choisie unilatérale (un écart nul) pour les aciers.

Dispersion de cote

À considérer pour les pièces à faible surépaisseur d'usage obtenues en moulage au sable avec assemblage de deux châssis. On admet $\cong 1 \text{ mm} \pm 0,5$.

Intervalle de tolérances dimensionnelles de moulage

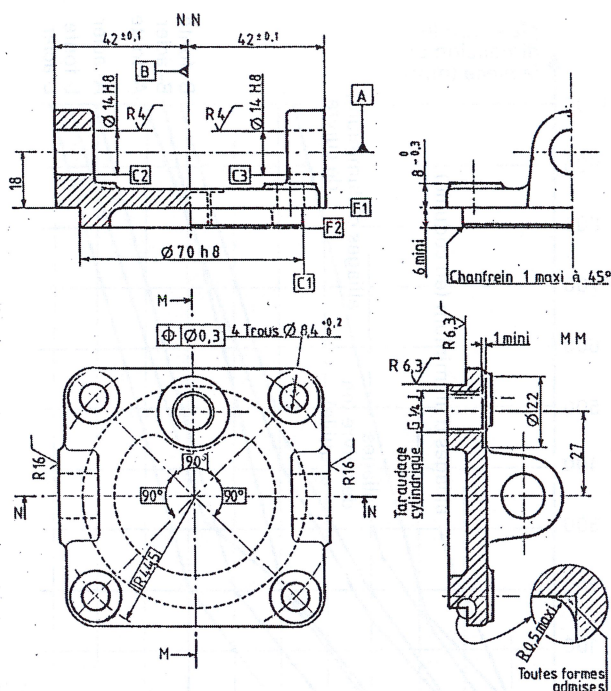
À ajouter à la surépaisseur d'usage des surfaces fonctionnelles. Selon les procédés de moulage, d'après la plus grande dimension D des pièces.

- aciers coulés; fontes grises, alliées et spéciales : IT (moulage au sable) $\pm (0,5 + 0,002 D)$ en millimètres.
- alliages d'aluminium : $\pm 0,3$ à $\pm 0,8$ (en moules métalliques) et js11 à js12 (sous pression).
- alliages de cuivre : $\pm 0,5$ à ± 1 (en moules métalliques) et js13 (sous pression).
- alliages de zinc : $\pm 0,1$ à $\pm 0,2$ (en moules métalliques) et js10 (sous pression).

FIGURE 10.5

Définitions d'une pièce mécanique.
(support d'épreuve d'examen).

Définition du produit fini



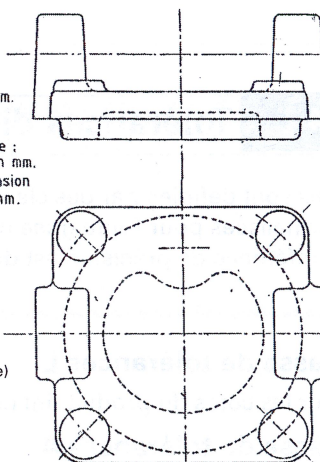
- A : axe commun à C2 et C3.
- B : axe $\perp$ à F1 passant par le centre de C1 dans F1.
- Matière : A-S5 U.
- Ébauche moulée au sable.
- R25 $\sqrt{\quad}$ sauf indication.

C2	⊙	∅ 0,02	A
C3	⊙	∅ 0,02	A
F1	//	0,05	A
F2	//	0,05	F1

Définition du produit brut (non coté)

- Matière A-S5 U.
- Moulage à la machine
 au sable.
- Dépouille : 2 %.
- Congés de
 raccordement : R 2 mm.
- Intervalles de tolérances
 des côtes de fonderie :
 IT = $\pm (0,5 + 0,002 D)$ en mm.
 0 = plus grande dimension
 de la pièce en mm.
- Surépaisseurs
 d'usinage : ≈ 2 mm.
- R25

Remarque: surépaisseurs
d'usinage "ombrées".
(pièce supposée transparente)



1.5 État de surface

Selon le procédé d'obtention des pièces.

Moulage au sable 12,5 à 6,3 Ra ; moulage métallique 6,3 à 3,2 Ra ; moulage sous pression 3,2 à 1,6 Ra ; moulage cire perdue 1,6 à 0,8 Ra.

1.6 Conception des pièces moulées

Règles technologiques de conception du produit moulé « brut capable » de contenir le produit fini (fig. 10.5).

Aptitude à l'usinage

Prévoir des formes facilitant l'usinage de la pièce :

Mise en position efficace (appuis et fixation) et non-déformabilité sous les efforts de bridage.

Permettre l'accès des outils à un maximum de surfaces dans une phase (sur centres d'usinage et de tournage) (fig. 10.6).

Parois de pièces

Concevoir l'épaisseur minimale et suffisante pour assurer le remplissage effectif de l'empreinte, en fonction de : alliage de coulée, dimensions de pièce, procédé de moulage.

Épaisseur des parois

Augmente avec les dimensions de la pièce et doit être relativement constante (fig. 10.7).

Nécessaires variations d'épaisseur progressives : évite criques et retassures (retard de solidification dû à une rapide variation d'épaisseur).

Rapport de variation admis : 1,5 maxi avec pente de raccordement à 10 % (fig. 10.8).

Raccordement des parois par congés : facilite le remplissage de l'empreinte.

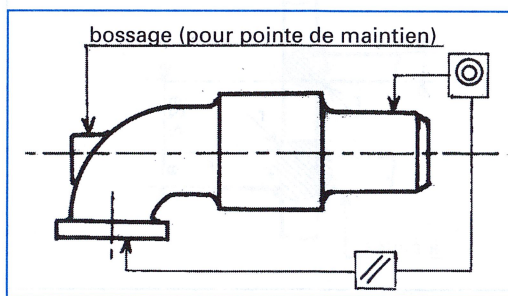


FIGURE 10.6 Bossage sur pièce facilitant la mise en position d'usinage.

Alliages	Moulage		
	Au sable	Métallique	
		Par gravité	Sous pression
Aciers	6 mm		
Fontes	5 mm		
Alliage d'aluminium	4 mm	3 mm	1 mm
Alliage de cuivre	5 mm	2,5 mm	1,5 mm
Alliage de zinc		2 mm	0,5 mm

FIGURE 10.7 Épaisseurs minimales des parois.

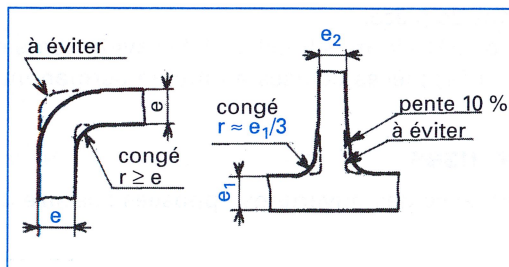


FIGURE 10.8

Raccordements de parois.

Forme des parois

Parois inclinées (sur la verticale) : donne une dépouille naturelle ; toiles inclinées (sur l'horizontale) : favorise l'évacuation des gaz à la coulée (fig. 10.9).

Éviter les parois verticales et les toiles horizontales.

Nœuds de nervures

À simplifier pour éviter les points chauds qui retardent la solidification (fig. 10.10).

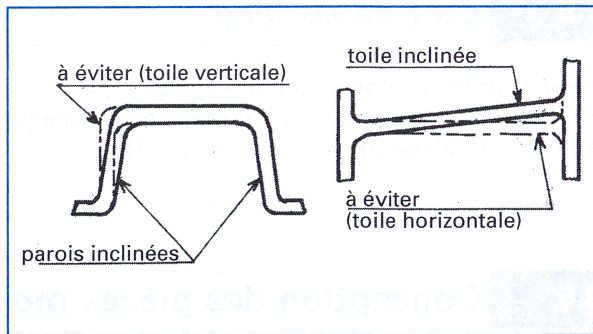


FIGURE 10.9 Paroi et toile inclinées.

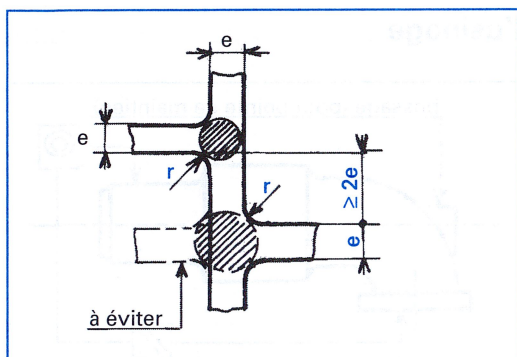


FIGURE 10.10 Nœud de nervures.

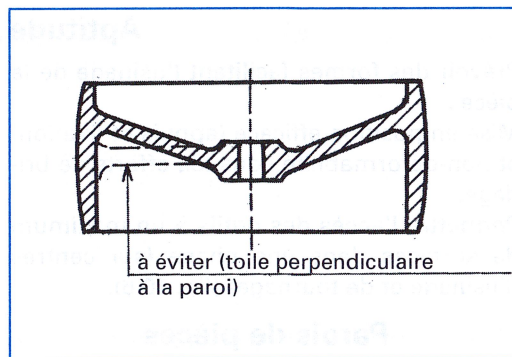


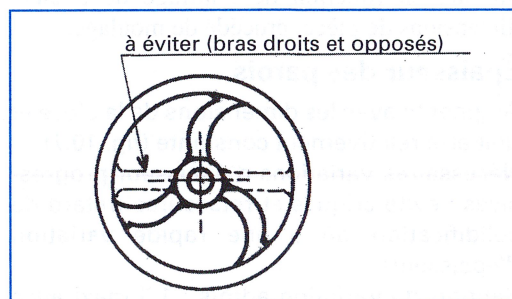
FIGURE 10.11 Toile de raccordement.

Bras et toiles de raccordement

À concevoir non rectilignes et non perpendiculaires à la paroi pour assurer la déformation élastique durant la solidification : le retrait au refroidissement provoque des contraintes internes à la jonction des parois (fig. 10.11 et 10.12).

FIGURE 10.12

Bras de raccordement.



Dépouilles

Assurent l'extraction du modèle de son empreinte, avant moulage de la pièce. Elles varient selon le procédé utilisé, la forme et les dimensions de pièce.

On considère : cas général, dit dépouille normale : 2 % ; formes fragiles : 5 % ; évidements et nervures peu hautes : 10 % ; grandes surfaces : 1 % ; pièces coulées en moule permanent : 0,5 %.

Pièces creuses

Nécessairement noyautées, elles auront de préférence des ouvertures opposées : assure un maintien stable du noyau (fig. 10.13).

Noyaux

N'ont pas de dépouille en intérieur de pièce.
Éviter d'en placer en extérieur de pièce.

Plan de joint de moulage

Permet le démoulage du modèle. Contient la plus grande section ou le plan de symétrie de la pièce, limite le nombre de noyaux et favorise leur stabilité dans le moule (fig. 10.14).

Sollicitations des pièces finies

Formes des pièces moulées, à concevoir en recherchant l'équilibre des sollicitations à subir par la pièce finie.

Caractéristiques mécaniques à considérer : résistance à la compression supérieure à la résistance à la traction ; résistance à la flexion assurée par des formes nervurées ; résistance à la torsion assurée par des formes en caisson.

Trous venant du moulage

Dans les limites de conception permises : Trous de grand diamètre : viennent du moulage, à renforcer par un bossage (fig. 10.15). Moulage au sable : trous inférieurs à 15 mm, ne viennent pas du moulage.

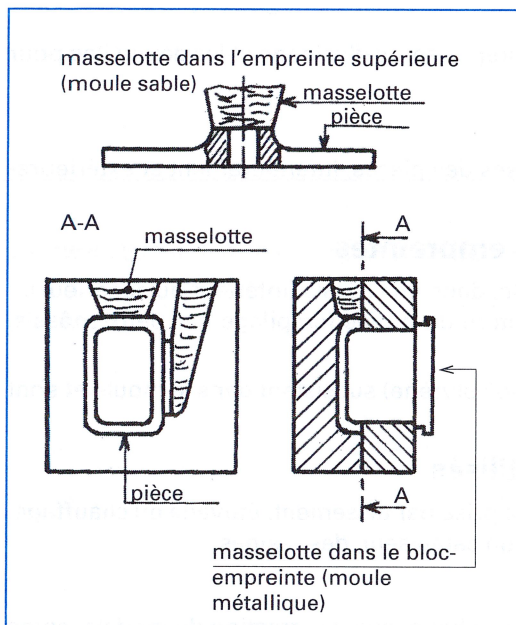


FIGURE 10.15 Masselottage de pièces.

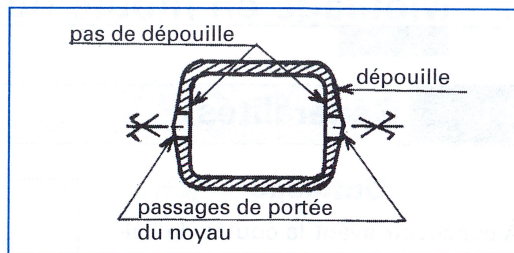


FIGURE 10.13

Pièce creuse avec ouvertures pour noyutage.

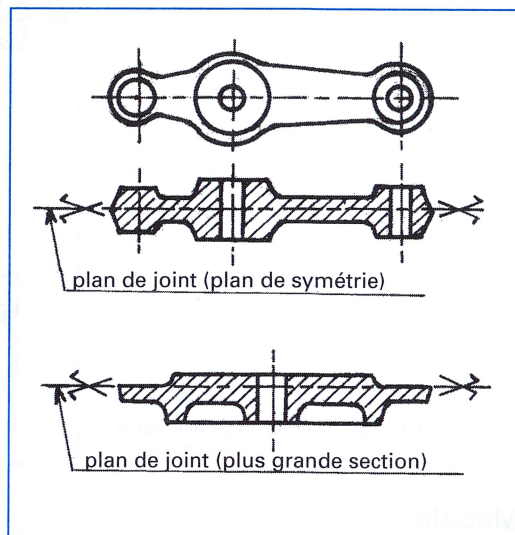


FIGURE 10.14 Plans de joint de moulage.

Masselottage

Réserve de métal qui déporte la retassure hors pièce. Maintient le métal à l'état liquide le plus longtemps possible.

La retassure est le défaut principal du moulage, causé par la contraction (le retrait) de l'alliage durant sa solidification.

Cet excédent d'alliage est à faire venir en partie supérieure de la pièce (ou se situe la retassure) (fig. 10.15).

La masselotte doit être de forme massive et reliée au maximum à une partie massive de la pièce, son action étant de courte durée.

2. Moulage en moule non permanent

2.1 Généralités

Outillage

À concevoir avant la coulée de l'alliage : modèle en boîte à noyau (fig. 10.16).

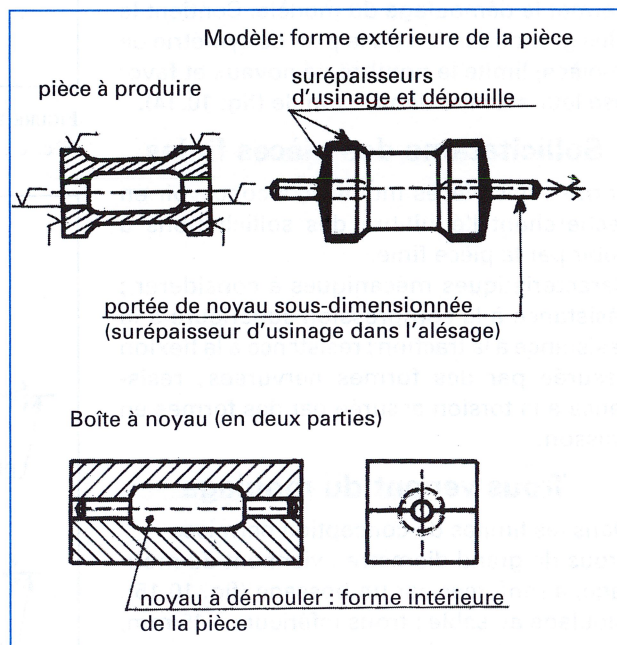


FIGURE 10.16

Outillage à concevoir en moulage à modèle bois.

Modèle

Il définit la forme extérieure des pièces avec les surépaisseurs d'usinage et les dépouilles pour son démoulage.

Boîtes à noyau

Moulage des noyaux définissant les formes creuses des pièces, intérieurement et extérieurement.

Réalisation des empreintes

Tassement du sable de fonderie autour du modèle, dans un châssis (inférieur ou supérieur). Extraction du modèle de son empreinte et fermeture du moule (empilage des deux châssis, supérieur et inférieur).

Nota : Modèles perdus, thermofusibles (en cire, polystyrène) subsistent dans le moule et sont éliminés durant la coulée de l'alliage.

Sables utilisés

Silico-argileux naturel ou synthétique : « à vert », à prise par tassement, étuvage ou chauffage. Siliceux. À prise en boîte froide ou chaude, avec un catalyseur, des résines.

Prise du sable

(Durcissement sur le modèle). Effectuer à froid ou à chaud, avant extraction du modèle, selon le procédé de moulage mis en œuvre.

2.2 Moulage au trousseau

Moulage en moule non permanent, sans outillage (ni modèle, ni boîte à noyaux) avec prise à froid du sable.

Un gabarit, le trousseau, permet de réaliser l'empreinte dans le sable de moulage (sable étuvé, en principe (fig. 10.17)). Les éventuels noyaux sont réalisés de la même façon.

Utilisation

Production unitaire de grandes pièces à section constante :

- Pièces longues : l'empreinte est obtenue par translation du gabarit.
- Pièces cylindriques courtes : l'empreinte est obtenue par rotation du gabarit autour d'un pivot.

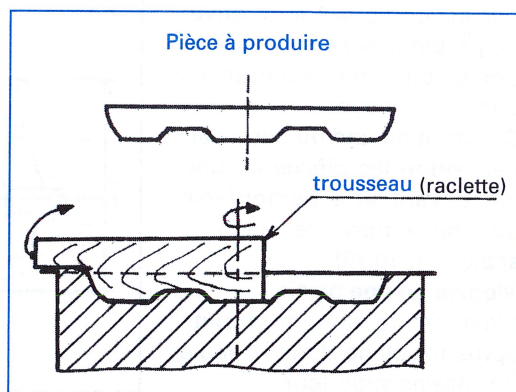


FIGURE 10.17 Moulage au trousseau (pièce cylindrique courte).

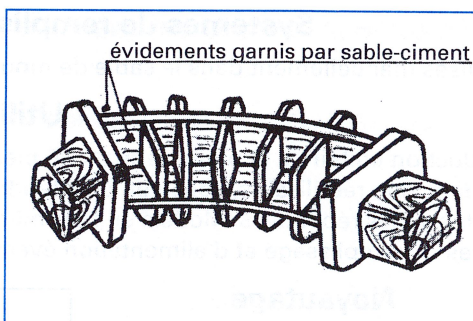
2.3 Moulage en carcasse ou squelette

Moulage en moule non permanent, à partir d'une structure en bois matérialisant les principaux profils de la pièce.

La structure – carcasse ou squelette – est remplie de sable, afin de modeler le modèle, complétant les formes de la structure (fig. 10.18).

FIGURE 10.18

Modèle carcasse ou squelette
(grosse pièce tubulaire).



Sable de moulage

Associé à du ciment, constitue un moule rigide (prise à froid, en quelques jours).

Utilisation

Production unitaire de très grandes pièces au profil non régulier (surface enveloppe de plusieurs mètres carrés).

2.4 Moulage avec modèle bois

Moulage en moule non permanent, avec un modèle réutilisable (en bois) donnant son empreinte dans le sable de moulage.

Noyaux éventuels. En sable de moulage, réalisés dans des boîtes à noyaux réutilisables (en bois) par moulage mécanique en général.

Modèle (au naturel)

Correspond à la forme enveloppe extérieure de la pièce brute, plus les éventuelles portées de noyau.

Construit en une ou deux parties, selon les pièces à obtenir, devant être démoulable de son empreinte dans le sable (fig. 10.19).

Modèle en une partie.

S'extraît de son empreinte après moulage dans le sable du châssis supérieur.

Modèle en deux parties.

Séparées à la surface du plan de joint; chaque châssis reçoit une empreinte (une partie de la pièce).

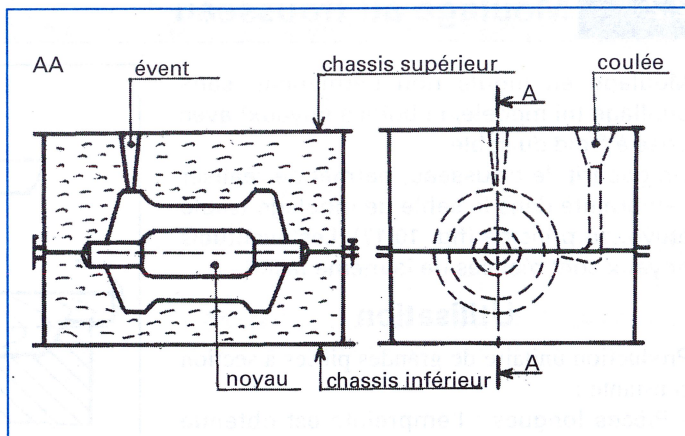


FIGURE 10.19 Moulage avec empreinte par modèle bois.

Sable utilisé

À vert ou étuvé, durci à froid. Pour les noyaux, durci de préférence à chaud.

Systèmes de remplissage et d'alimentation

Réalisés manuellement dans le sable de moulage.

Utilisation

Production unitaire à la petite série ($\cong 20$ pièces maxi).

Modèle, non réutilisable, conçu en bois tendre (bois dur aux parties fragiles).

Petites séries répétitives. Modèle en bois mi-dur et dur : utilisation pour 100 pièces maxi : systèmes de remplissage et d'alimentation éventuellement en bois.

Noyautage

Le noyau comble un volume qui constitue une forme non remplie par l'alliage à la coulée. Il est maintenu en position dans l'empreinte par les portées situées dans le sable (au moulage préalable du modèle).

Noyau intérieur de l'empreinte.

Produit une forme en creux (après élimination) dans la pièce solidifiée (fig. 10.19 et 10.20).

Noyau extérieur à l'empreinte.

Obtention de formes qui ne seraient pas moulables avec le modèle, en faisant fonction de chape (fig. 10.21).

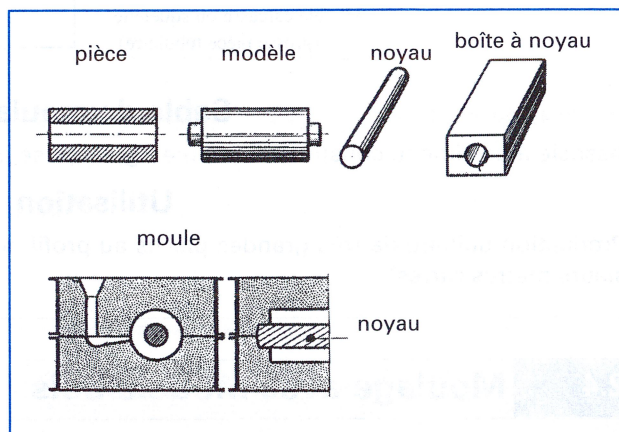


FIGURE 10.20 Moulage avec noyau intérieur à la pièce.
(Doc. Éditions techniques des industries de la fonderie).

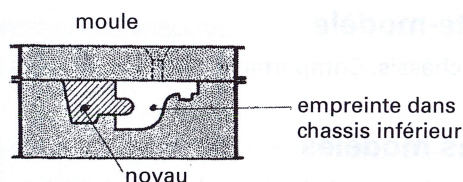
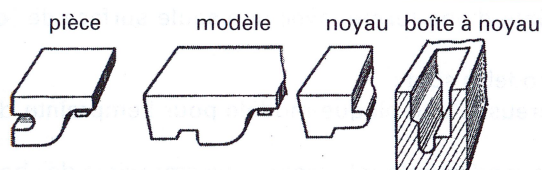


FIGURE 10.21

Moulage avec noyau extérieur à la pièce.
(Doc. Éditions techniques des industries de la fonderie).

2.5 Moulage avec plaque-modèle métallique

Moulage en moule non permanent, à partir d'un mode réutilisable (en bois) conçu en une forme ou deux formes.

Chaque forme, généralement, est fixée sur une plaque métallique, ainsi que les systèmes de remplissage et d'alimentation (fig. 10.22).

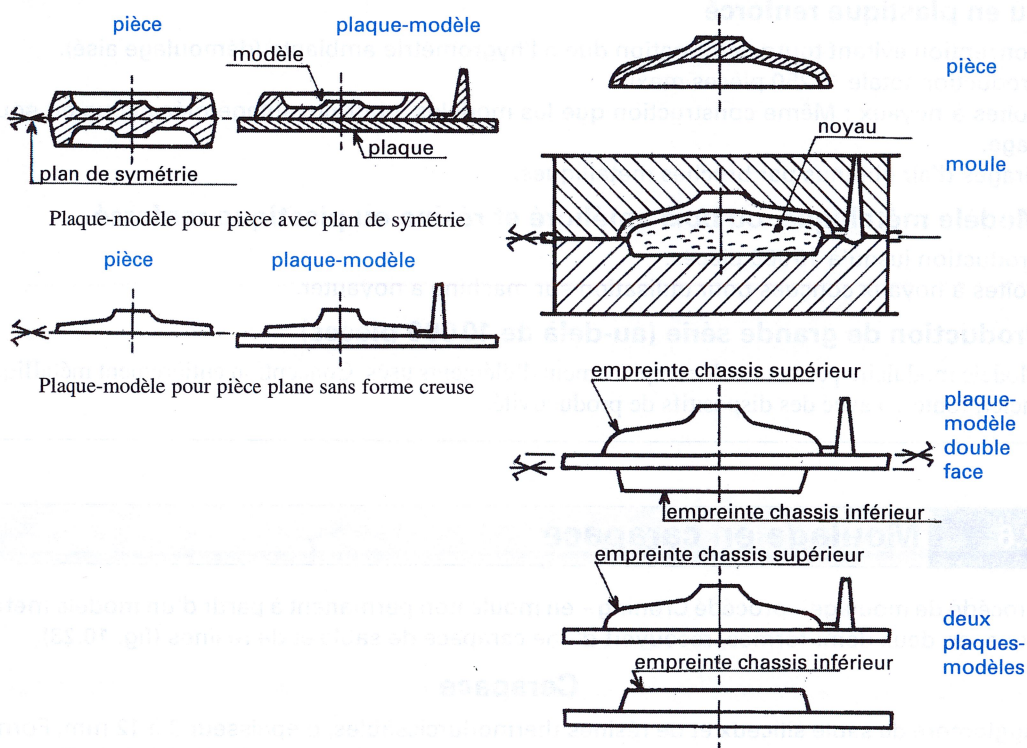


FIGURE 10.22 Plaques-modèles (pour moulage mécanique).

Chaque châssis du moule reçoit l'empreinte d'une forme, avec une seule surface de joint, plane.

Selon les pièces à produire, les plaques-modèles sont :

Pièces avec une face plane, sans forme creuse : une plaque-modèle pour l'empreinte de la pièce dans un châssis.

Pièces avec une forme creuse : une plaque-modèle « double-face » (une empreinte de chaque côté de la plaque) ou deux plaques-modèles.

Plaques porte-modèle

Généralement en acier, dimensionnées pour les châssis. Comportant un réseau de trous pour fixer différents modèles.

Matériaux des modèles

Selon l'importance de la série et la complexité des formes de la pièce : bois dur vernis ou surmoulé de résines synthétiques ; plastique renforcé en acier aux zones fragiles ; alliage d'aluminium ; résines stratifiées ; acier.

Utilisation

Production de petite à grande série, de pièces de bonne précision en moulage mécanique.

Modèle en bois demi-dur et dur

Production totale $\cong$ 150 pièces maxi. Avec modèle dédoublé par surmoulage, production de plusieurs centaines de pièces (moins précises).

Modèle en bois dur vernis et/ou bois amélioré avec zones fragiles en métal ou en plastique renforcé

Conception évitant toute déformation due à l'hygrométrie ambiante (démoulage aisé).

Production totale $\cong$ 250 pièces maxi.

Boîtes à noyaux : Même construction que les modèles, pour noyautage mécanique ou soufflage.

Tirages d'air obtenus par broches métalliques.

Modèle métallique, ou bois amélioré et résine ou plastique renforcé

Production jusqu'à 10 000 pièces.

Boîtes à noyaux conçues pour utilisation sur machine à noyauter.

Production de grande série (au-delà de 10 000 pièces)

Modèle modulaire permettant le remplacement d'éléments usés. Conception entièrement métallique (acier, fonte...) avec des dispositifs de productivité.

2.6 Moulage en carapace

Procédé de moulage – procédé Croning – en moule non permanent à partir d'un modèle métallique, en deux demi-formes, recouvert d'une carapace de sable et de résines (fig. 10.23).

Carapace

Aggloméré de sable siliceux et de résines thermodurcissables, d'épaisseur 3 à 12 mm. Forme une croûte par polymérisation au contact du modèle métallique chauffé (250 à 300 °C).

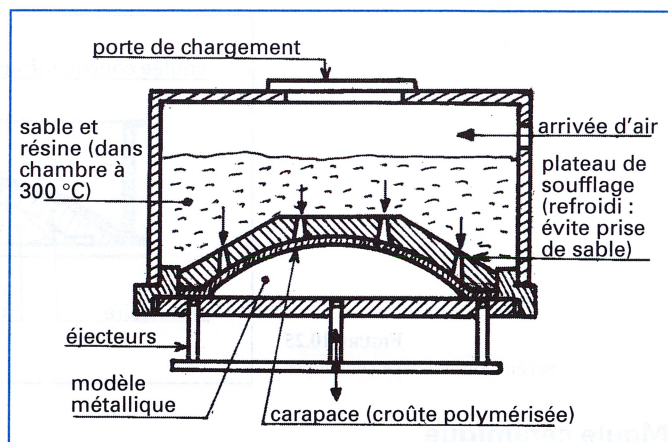


FIGURE 10.23

Schéma de principe du moulage en carapace (soufflage par le haut).

Sable

Préenrobé de résines, amené au modèle par soufflage ou par renversement. De faible granulométrie : obtention d'un bon état de surface des pièces.

Modèle

Plaque-modèle métallique, avec système d'éjection de la carapace. Conçue pour une production de 10 000 pièces à la série illimitée (jusqu'à usure de l'outillage).

Noyaux

Obtenus en carapace (pouvant être évidés) à l'aide de machines spécifiques à souffler le sable par le bas (noyaux d'un kilogramme maxi) ou par le haut (noyaux importants). Machine à soufflage du sable par le bas : noyau formé dans une boîte à noyau métallique ouvrante, formant la carapace enveloppe (fig. 10.24).

Utilisation

Production de petite à grande série, de pièces aux dimensions moyennes à très petites qui nécessitent précisions dimensionnelle et d'état de surface.

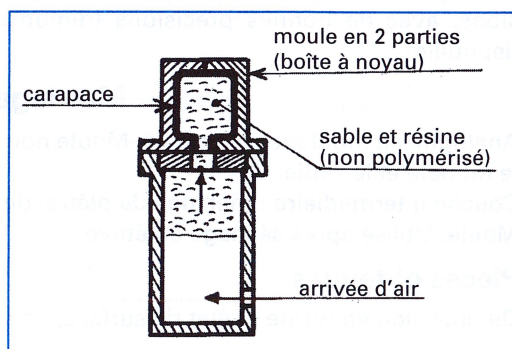


FIGURE 10.24 Schéma de principe du moulage en carapace d'un noyau (soufflage par le bas).

10

2.7

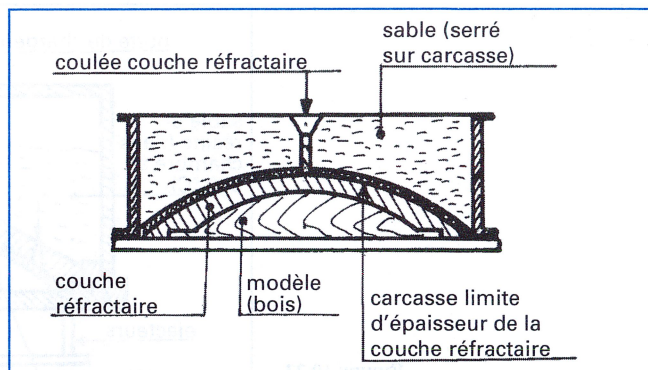
Moulage céramique, au plâtre, avec élastomère

Moulage céramique

Moulage en moule non permanent de précision, à partir d'un modèle en bois qui donne son empreinte dans une couche intermédiaire au sable du moule (fig. 10.25).

Couche intermédiaire : produits réfractaires liés au silicate d'éthyle, d'une épaisseur de 10 à 15 mm, obtenue par une forme limitant l'épaisseur.

FIGURE 10.25
Schéma du moulage céramique.



Moule céramique

Conserve durant quelques minutes une consistance élastique permettant le démoulage du modèle (d'une très faible dépouille) ; frittage de la céramique (chauffe $\cong 900\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Pièces obtenues

De bonne qualité : la finesse du grain des produits réfractaires donne un excellent état de surface ; faible dilatation du moule à la coulée (le chauffage donne de la perméabilité) : assure une très bonne précision dimensionnelle.

Utilisation

Moulage manuel en production unitaire à petite série : pièces de moyennes à grandes dimensions, avec de bonnes précisions (dimensionnelle, état de surface, pas ou très peu de dépouille).

Moulage au plâtre

Analogue au moulage céramique. Moule non permanent avec une couche intermédiaire entre le modèle et le sable.

Couche intermédiaire : mélange de plâtre, de silice, de talc et d'un adjuvant (ciment...).

Moule. Utilisé après séchage en étuve.

Pièces obtenues

De précision en forme et état de surface, par la finesse du plâtre.

Utilisation

Moulage manuel, en production unitaire à la petite série, de pièces de petites et moyennes dimensions aux formes complexes, avec un bon état de surface.

Moulage avec élastomère

Analogue au moulage céramique. Moule non permanent avec une couche intermédiaire entre le modèle et le sable.

Couche intermédiaire. En élastomère (qui résiste jusqu'à la température de $250\text{ }^{\circ}\text{C}$) : assure une excellente précision de l'empreinte.

Utilisation

Moulage de formes complexes.

2.8 Moulage à la cire perdue

Moulage en moule et modèle non permanent, à partir d'un modèle en cire comprenant la forme de la pièce sans dépouille avec les systèmes de remplissage et d'alimentation.

Modèle

Il est produit par moulage dans un moule maître, en production de série ; une grappe de modèles-pièces peut être constituée pour optimiser la coulée (cas des petites pièces) (fig. 10.26).

Après réalisation, il est recouvert d'une couche de 3 à 12 mm des produits réfractaires liés au silicate d'éthyle, par trempage ou projection formant une carapace. Installé dans le moule (en sable) généralement en une partie (modèle et systèmes de remplissage-alimentation) il est éliminé par fusion (chauffage du moule).

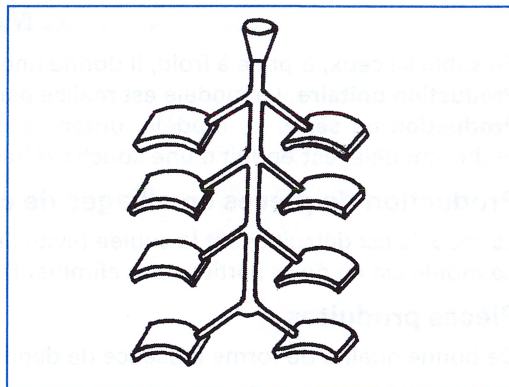


FIGURE 10.26 Grappe de modèles (en cire) pour moulage à la cire perdue.

Moule

Il est fritté (à 900 °C) et utilisé à chaud, améliorant la coulabilité de l'alliage avec limitation de chocs thermiques. Il peut éventuellement être consolidé (maillage de fils métalliques, amas de sable).

Utilisation

Moulage manuel, en production unitaire à la petite série, de pièces de forme complexe, très petites à moyennes avec des alliages de mauvaise coulabilité.

Les précisions dimensionnelle et d'état de surface sont très bonnes. Les pièces peuvent être minces, sans dépouille ni plan de joint.

10

2.9 Moulage avec modèle gazéifiable

Moulage en moule et modèle non permanents, avec un modèle en polystyrène expansé ou en polyuréthane, comprenant la forme de la pièce sans dépouille avec les systèmes de remplissage et d'alimentation. (fig. 10.27).

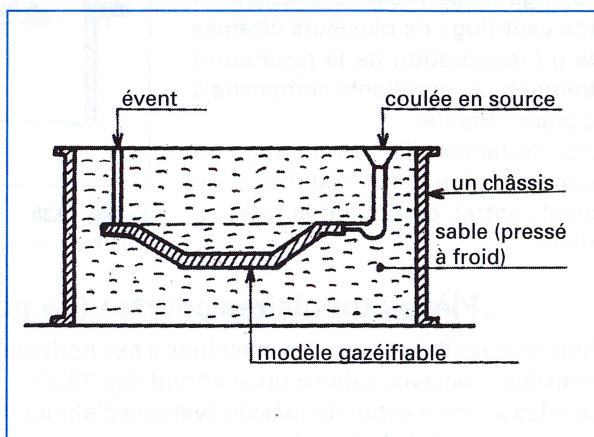


FIGURE 10.27

Schéma du moulage avec modèle gazéifiable.

Modèle et systèmes de remplissage et alimentation

Après installation dans le moule (généralement en une partie) il est détruit par gazéification (dispersé dans le moule) à la coulée de l'alliage.

La coulée, avec le procédé « LOST-FOAM » se fait par dépression.

Moule

En sable siliceux, à prise à froid, il donne une bonne précision de la pièce.

Production unitaire. Le modèle est réalisé par découpage dans le polystyrène en plaque.

Production de série. Le modèle, obtenu par moulage du polystyrène en poudre dans un maître-modèle, est enduit d'une couche réfractaire le rigidifiant.

Production de pièces en alliages de composition chimique précise

Le modèle est détruit avant la coulée (évite un gazéifiage).

Le moule est en deux parties pour éliminer le modèle (par combustion et/ou fragmentation).

Pièces produites

De bonne qualité de forme (absence de dépouille au modèle).

Utilisation

Production de pièces de toutes dimensions, unitaire et en particulier de grande série (par coulée en grappe de petites pièces, avec machine spécifique de fabrication des modèles et unité de production (procédé « LOST-FOAM »).

2.10 Moulage par centrifugation

Moulage en moule non permanent avec modèle réutilisable, donnant son empreinte dans le sable (fig. 10.28).

La coulée s'effectue dans le moule en rotation, pour des pièces essentiellement équilibrées.

L'alliage coulé reçoit une accélération centrifuge de plusieurs dizaines de g (accélération de la pesanteur) donnant une excellente compacité à la pièce obtenue.

Les systèmes de remplissage et d'alimentation sont réduits à un canal central, diminuant la mise au mille.

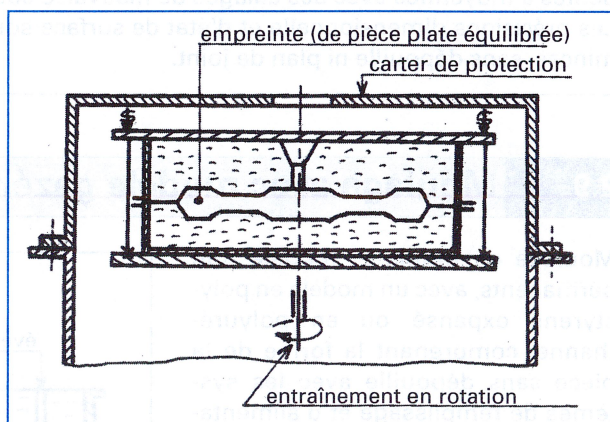
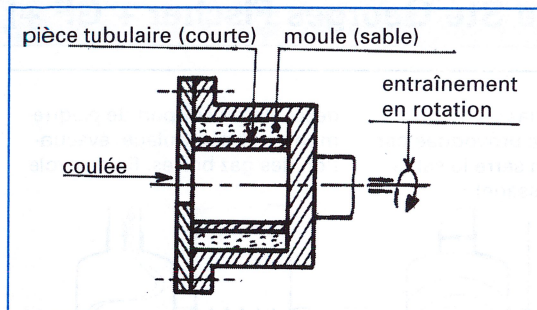


FIGURE 10.28 Schéma de principe du moulage par centrifugation (machine à axe vertical).

Pièces tubulaires courtes (de petit à moyen diamètre)

Elles sont réalisées avec des machines à axe horizontal. Le moule est réalisable également par centrifugation avec sable à prise à froid (fig. 10.29).

La mise au mille est nulle (pas de système d'alimentation et de remplissage, la coulée s'effectuant au centre de la pièce).



Moules. Ils doivent être rigides et maintenus efficacement.

Utilisation

Production unitaire et en série, de pièces tubulaires courtes et de pièces cylindriques plates.

FIGURE 10.29

Schéma de principe du moulage par centrifugation (machine à axe horizontal).

2.11 Moulage V process

Moulage en moule non permanent dont l'empreinte est recouverte d'un film plastique assurant la stabilité du moule durant son utilisation.

Film de plastique. Chauffé et tiré par effet du vide sur le modèle placé dans un châssis avec chambre à vide (fig. 10.30).

En acétate de vinyl éthylène, très moulant, il adhère au sable dans l'empreinte lors du moulage. Il se vaporise, sans brûler, au contact de l'alliage en fusion, formant dans le moule une couche stabilisatrice.

Sable de moulage, quartzueux à grains fins, utilisé à sec, sans liant ni additif, serré énergiquement par vibrations et durci par évacuation de l'air (avec une faible dépression).

L'extraction du modèle est effectuée avec une faible surpression dans l'empreinte.

Le décochage de la pièce est favorisé par la suppression du vide.

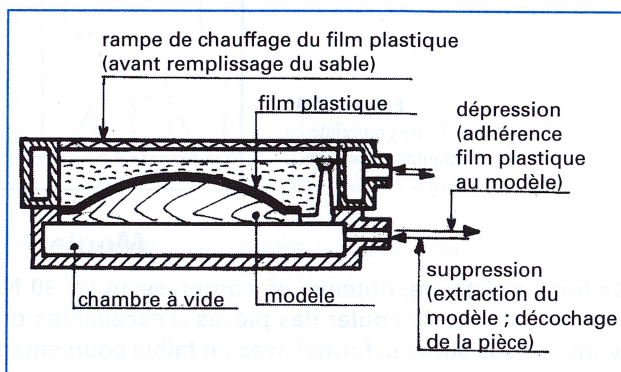


FIGURE 10.30 Schéma de réalisation d'une empreinte en moulage V process.

Pièces obtenues

Elles ont un excellent état de surface et sont de bonne précision dimensionnelle, avec un faible pourcentage de rebut (parfaite adhérence du film plastique thermoformé ; compacité régulière et élevée du moule ; diminution de la trempe superficielle et de la dépouille).

La durée de vie des modèles est accrue.

Sécurité

Les conditions de travail sont améliorées (élimination des bruits, poussières, vapeur et gaz, efforts physiques).

Utilisation

En production automatisée (noyautage, moulage, décochage) de pièces diverses petites et moyennes, de la petite à la grande série.

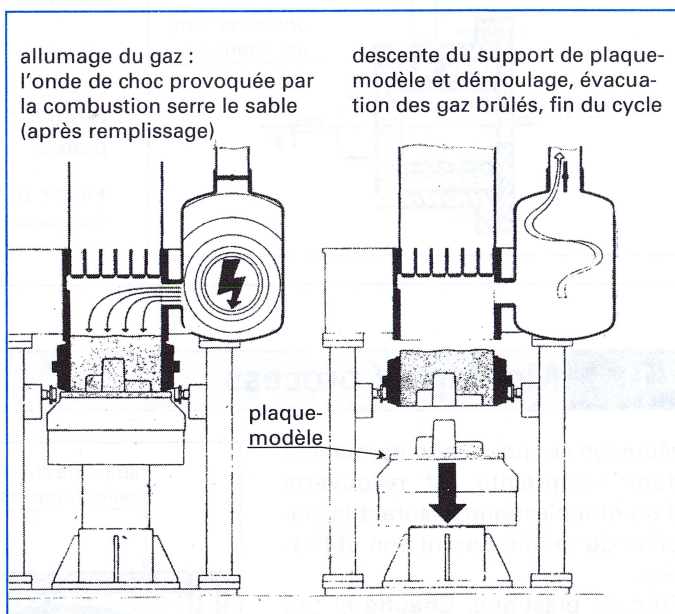
Moulage en moule non permanent, ou le serrage du sable (à vert) dans le moule est obtenu par onde de choc provoquée à l'inflammation d'un mélange air-gaz (donnant une pression de 5 bars dans la chambre de combustion) (fig. 10.31).

Le sable est dosé à la quantité nécessaire pour le remplissage du moule. Son serrage est plus fort du côté du plan de joint, donc sur le modèle.

FIGURE 10.31

Réalisation d'une empreinte en moulage par impact.

Doc. Sté Georges Fischer + GF



Moule

Sa forte résistance, obtenue en compression ($\approx 30 \text{ N/cm}^2$) sur toutes les surfaces de l'empreinte, permet de couler des pièces d'excellentes qualités (dimensionnelle, constance de poids, état de surface, forme) avec un faible pourcentage de rebuts et une réduction de l'ébarbage.

Modèles et plaques-modèles

Ils sont de même conception qu'en moulage avec plaques-modèles métalliques.

Sécurité

Les conditions de travail sont améliorées, par la réduction du bruit en particulier.

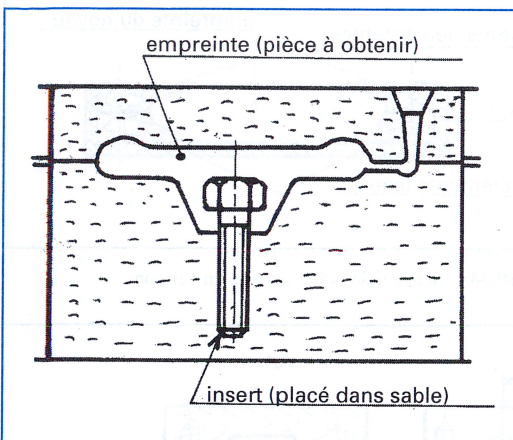
Utilisation

Production de série, des pièces en alliages légers, acier, fontes (grise, GS, malléable) de moyennes dimensions avec des machines spécifiques.

Procédé de grande productivité (rapidité de serrage du sable) le rendant très compétitif.

De la forme d'éléments complémentaires à la pièce coulée (vis, pivot...), ils sont installés dans les empreintes du moule avant la coulée, en moulage avec modèle et plaque-modèle.

Ces formes complémentaires ont leur partie fonctionnelle placée dans le sable, et une autre partie située dans l'empreinte pour insertion dans l'alliage solidifié (fig. 10.32).



Utilisation

En production unitaire et de série pour : obtenir des pièces moulées avec des formes fonctionnelles (filetages, pivots...) sans usinage ultérieur à la coulée (souvent difficile à effectuer).

Avoir un matériau adapté à la fonction (vis en acier dans pièce en alliage léger...)

Simplifier la confection du modèle et du moule.

FIGURE 10.32

Schéma de moule avec insert.

2.14 Appareillages de moulage non permanent

Châssis

Ils constituent le cadre métallique de maintien du sable, dimensionné pour contenir la pièce à mouler.

Leurs formes, rectangulaires, carrés ou cylindriques et leurs dimensions sont standardisées (de 250 à 5000 mm de longueur ou diamètre et hauteur de 100 à 400 mm) (fig. 10.33).

Ils sont conçus pour le moulage à main et mécanique, avec mise en position (châssis inférieur avec supérieur) assurée par des goujons (2 à 4, selon les dimensions du moule).

FIGURE 10.33

Principales dimensions des châssis.

Valeurs indicatives		
Longueurs l ou Ø D	Hauteurs h courantes	Largeurs mini à maxi
250	100-80	160
315	100-80	250
400	125-100	250-315
500	125-100	250-400
630	125-160	250-500
800	160-200	250-630
1000	160-200	250-800
1250	160-200	315-1000
1600	200-250	400-1250
2000	200-250	500-1600
2500	250-315	500-2000
3150	250-315	500-2500
4000	315-400	500-3150
5000	315-400	630-4000

Boîtes à noyaux

Moules non destructibles conçus pour fabriquer des noyaux en sable nécessaires en moulage manuel et automatique (série).

Elles doivent permettre, après tassement du sable, l'extraction du noyau (le déboîtage) sans le détériorer, ce qui nécessite des éléments de boîtes démontables.

Moulage manuel

Les boîtes à noyaux, en bois, sont à cadre, en caisson, en auge, goujonnées, pour la production unitaire à la moyenne série.

Boîtes à cadre. Cadre sans fond, en deux parties démontables : conception de noyaux très simples en production unitaire à quelques pièces.

Boîtes en caisson et en auge. Constituées de plusieurs éléments assemblés dans un caisson démontable ou en auge, assurant le déboîtement rapide des éléments du moule (fig. 10.34).

À concevoir pour des noyaux complexes, en production unitaire à quelques pièces.

Boîtes goujonnées. En deux parties assurant le déboîtement facile (fig. 10.35).

L'assemblage des deux parties, par goujons et bagues métalliques, assure rapidité et précision de positionnement.

Des éléments intérieurs à la boîte peuvent être démontables pour le démoulage.

Boîtes les plus utilisées en moulage manuel.

Moulage en grande série

On utilise des boîtes à noyaux métalliques ou en résines synthétiques.

Boîtes métalliques. Utilisées sur machine à souffler les noyaux en moulage automatisé. Elles sont conçues pour faciliter le démoulage du noyau et la mise en position des différents éléments du moule (fig. 10.36).

Boîtes en résine synthétique. À partir d'un noyau master, on surmoule des boîtes à noyaux. L'intérieur de la boîte est généralement fretté pour éviter sa rupture.

Coût de fabrication relativement faible.

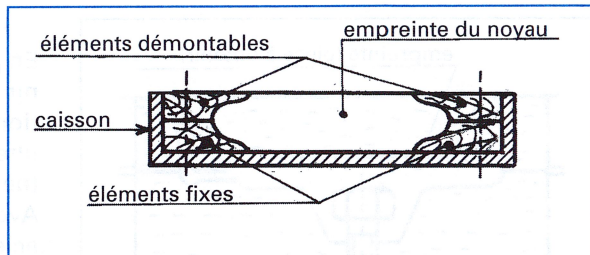


FIGURE 10.34 Schéma de boîte à noyau en caisson.

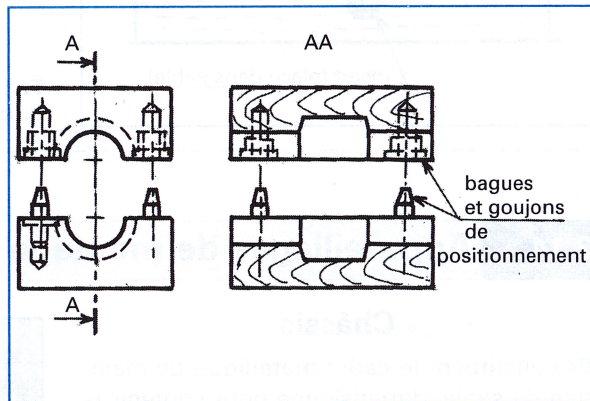


FIGURE 10.35 Schéma de boîte à noyau goujonnée.

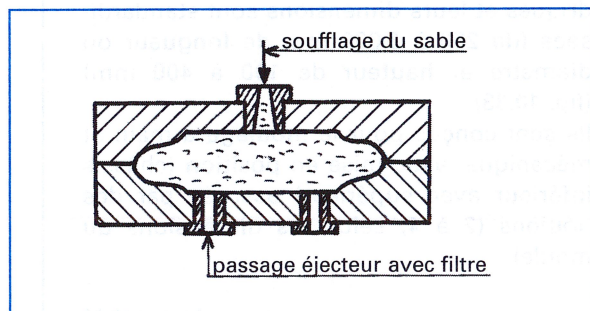


FIGURE 10.36 Schéma de boîte à noyau métallique.

2.15 Machines à mouler les noyaux

Moulage des noyaux dans leurs boîtes respectives, par remplissage et serrage du sable (différemment selon les dimensions des noyaux et la production à assurer).

Gros noyaux

Ils sont réalisés, comme les moules non permanents, sur machines avec pression et secousses.

Noyaux de petites dimensions

Ils sont réalisés en série, sur machine spécifique où le sable est soufflé dans la boîte. Remplissage de la boîte et serrage du sable sont rapides (la prise est limitée à une carapace de ≈ 10 mm) (fig. 10.37).

Production de grande série

Le sable est projeté dans la boîte, en émulsion avec l'air comprimé.

Boîte chaude

Les noyaux peuvent être obtenus en boîte chaude, comme les modèles; le sable, enrobé de résines, est soufflé dans la boîte à noyaux contenue dans une chambre métallique chauffée (≈ 200 °C) et durci rapidement en carapace (≈ 10 mm).

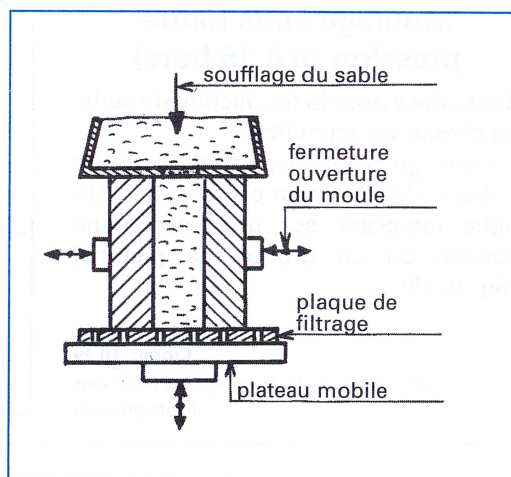


FIGURE 10.37 Schéma de principe de soufflage de noyau (moule à ouverture horizontale).

2.16 Machines à mouler

Pour moules non permanents. Moulage des empreintes, dans un châssis ou dans une motte, par serrage du sable autour du modèle démoulable (situé d'un côté du plan de joint) et extraction du modèle.

Le serrage du sable s'effectue, selon la production à assurer, sous basse ou haute pression.

Moulage sous basse pression (1,5 à 5 bars)

Il est utilisé pour la production de pièces de forme simple, sans précision particulière, avec un maximum de 50 pièces/heure (fig. 10.38).

Il est obtenu par pression et secousses (300 à 400 coups/min) de faibles amplitudes.

Moulage de grandes pièces

Le serrage s'effectue simultanément au remplissage du châssis.

Extraction du modèle

Son démoulage s'effectue :

Directement après moulage pour les formes simples.

Par retournement pour les formes complexes (le sable porte-moule bascule).

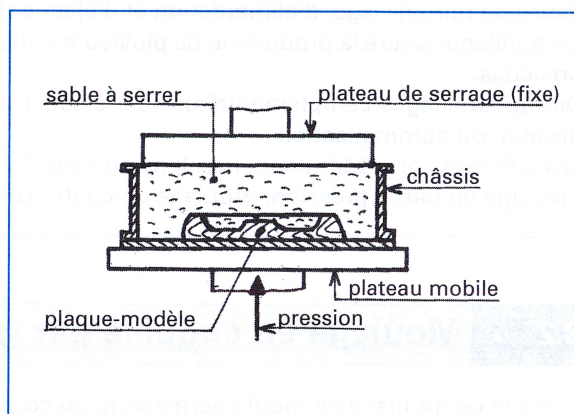


FIGURE 10.38 Schéma de poste de serrage du sable par pression.

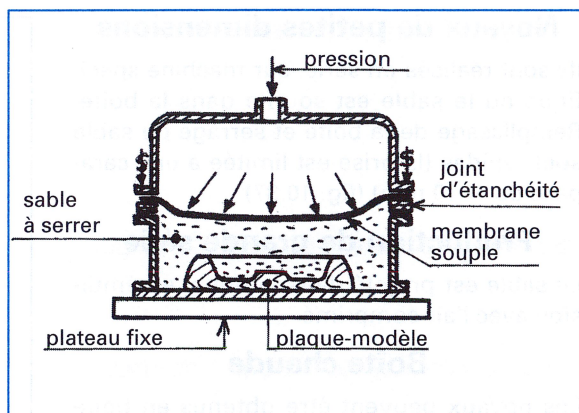
Moulage sous haute pression (6 à 15 bars)

Il est utilisé pour la production de série, en châssis ou en motte.

Le serrage du sable, en moulage en châssis, s'effectue par pression hydraulique (agissant sur une membrane souple, ou un groupe de pistons) (fig. 10.39).

FIGURE 10.39

Schéma de poste de serrage du sable sous haute pression



3. Moulage en moule permanent

3.1 Généralités

La mise en œuvre de chacun des procédés de moulage en moule permanent nécessite la fabrication – par usinage – de l'outillage métallique nécessaire (moule, noyaux et broches, systèmes de remplissage, d'alimentation et d'éjection).

Un outillage assure la production de plusieurs milliers à plusieurs millions de pièces, selon les procédés.

Des appareillages complémentaires sont à concevoir pour optimiser le processus par mécanisation ou automatisation.

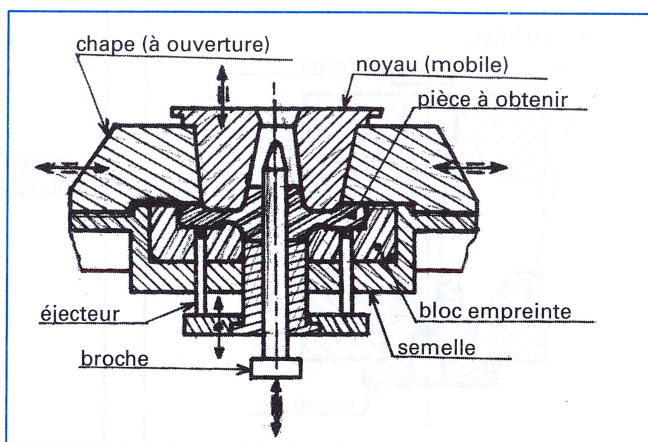
Les différents procédés sont : moulage en coquille par gravité, moulage sous haute pression, moulage en basse pression, moulage en contre-pression, moulage par centrifugation.

3.2 Moulage en coquille par gravité

Procédé de moulage en moule permanent, ou coquille ; tous les éléments constitutifs de l'outillage (blocs, empreinte, semelle, chapes, noyaux, broches, poussoirs, éjecteurs...) sont métalliques, ce qui permet d'effectuer des coulées de pièces, successivement, avec le même moule jusqu'à son usure (fig. 10.40).

Le moulage (fermeture du moule, remplissage et alimentation de l'alliage, démoulage de la pièce) est mécanisé ou automatisé.

FIGURE 10.40
Schéma de coquille en moulage série.



Moule

Il est constitué de plusieurs éléments : une semelle, des chapes, des refroidisseurs, des noyaux, des broches, (en coulée par gravité), le système d'éjection. Il comporte les systèmes de remplissage et d'alimentation.

Semelle

Elle supporte les chapes avec leur guidage pour ouverture-fermeture du moule. Elle peut contenir un bloc porte-empreinte d'une partie de la forme extérieure de la pièce.

Chapes

Chacune des (deux) chapes comporte l'empreinte d'une partie de forme extérieure de pièce. Elles coulissent sur la semelle pour l'ouverture du moule.

Noyaux

Ils donnent généralement des formes intérieures de la pièce.

Ils sont mobiles et doivent être mis en position et centrés avec un guidage efficace.

Leur direction de démoulage, verticale, oblique ou horizontale, sera fonction des formes de la pièce. Très échauffés durant la coulée, ils peuvent être refroidis par une circulation fluide (air ou eau) (fig. 10.41).

Un noyau pourra être conçu en plusieurs parties pour permettre le démoulage.

Ils peuvent être éventuellement en sable, pour de petites séries.

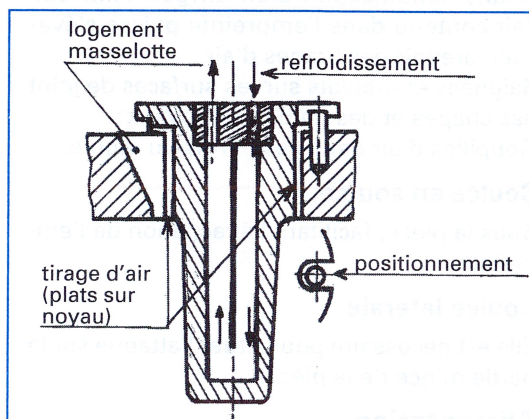


FIGURE 10.41 Noyau avec positionnement, tirage d'air et refroidissement.

Broches

Elles sont des noyaux de faible section

(cylindrique) et de grande longueur pour le moulage d'alésages longs. Elles sont guidées aux deux extrémités, éventuellement (fig. 10.42).

Remplissage de l'empreinte

Il doit être le plus rapide possible : l'échange thermique entre moule et alliage ne doit pas se refroidir trop rapidement.

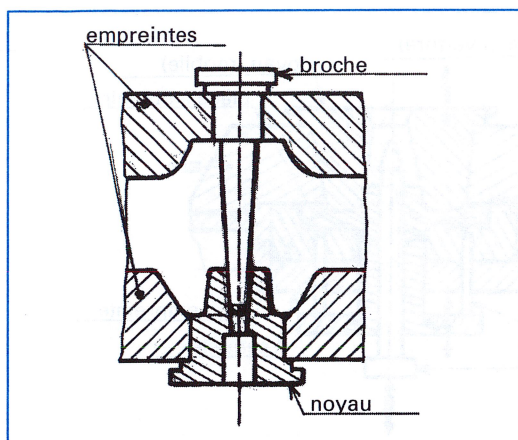


FIGURE 10.42 Broche guidée aux deux extrémités.

Le système de coulée (descente, canal, attaque(s)) réalisé dans le joint des chapes, est conçu en fonction de l'attaque de coulée en chute, en source, latérale (fig. 10.43), soit :

Coulée en chute

Par le haut de la pièce dans la masselotte (qui se solidifie en dernier) permettant un refroidissement minimum de l'alliage à la coulée et une solidification bien dirigée. Afin que l'air contenu dans l'empreinte puisse s'évacuer, prévoir des tirages d'air :

Saignées et méplats sur les surfaces de joint des chapes et des guides de noyaux ;
Goupilles d'air dans des parois du moule.

Coulée en source

Sous la pièce, facilitant l'évacuation de l'empreinte.

Coulée latérale

Elle est nécessaire pour situer l'attaque sur la partie mince de la pièce.

Alimentation

Elle assure le remplissage des empreintes pendant la solidification.

Rechercher à diriger la solidification des parties minces vers les parties hautes et à évacuer la chaleur hors du moule (refroidir par masselottes, poteyage, épaisseurs de chape, noyaux).

Refroidisseur

En métal bon conducteur de la chaleur, à situer contre une partie massive (fig. 10.44).

L'épaisseur des coquilles agit également en refroidisseur : en fonction des différentes épaisseurs d'une pièce à obtenir, on admet 20 mm pour les parties minces à 60 mm pour les parties très épaisses.

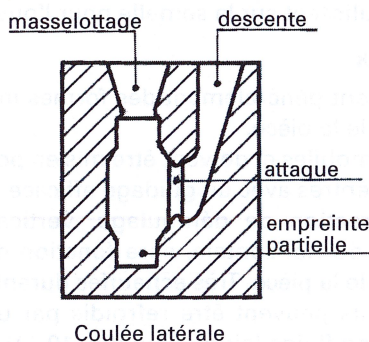
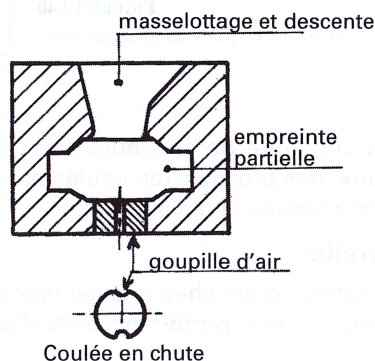
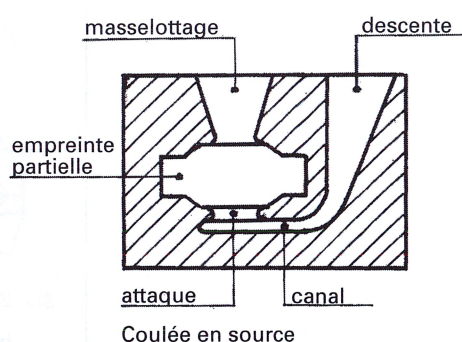
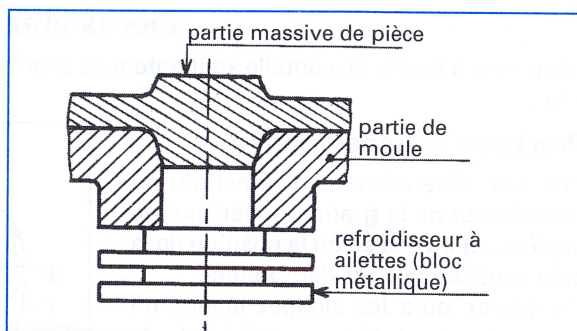


FIGURE 10.43 Schéma des systèmes de coulée.

FIGURE 10.44
Refroidisseur sur partie massive d'une pièce.



Masselottes

À situer près des volumes à solidifier en dernier : dans les chapes ou dans des chapes spéciales (chapes à jet).

Poteyage

Dépôt d'enduit spécifique dans l'empreinte et sur des éléments de moulage (noyaux, broches...) : agit sur l'évacuation de la chaleur (protection thermique de l'empreinte) et facilite le démoulage. La conductibilité de la chaleur est facilitée avec le poteyage.

Le poteyage noir facilite la conductibilité thermique.

Le poteyage blanc s'oppose à la conductibilité thermique.

Systèmes d'ouverture-fermeture

Ils sont mécanisés (pignon-crémaillère...) ou automatisés (vérins hydrauliques ou pneumatiques) selon l'importance de la production à assurer.

Le verrouillage des coquilles entre elles, avant la coulée, doit être efficace : assuré par le système d'ouverture-fermeture, ou par des crampes en petite série.

Système d'éjection

Il comprend des éjecteurs, généralement cylindriques, commandés par les plaques d'éjection (mouvements aller-retour).

Il est actionné par le système d'ouverture du moule.

L'éjection provoque l'extraction de la pièce solidifiée dans l'empreinte.

Le démoulage est facilité par les dépouilles (1 à 3°) et un important poteyage.

La pièce doit être retenue dans l'empreinte située du côté de l'éjection (par une faible dépouille et la forme de l'empreinte).

Les éjecteurs sont répartis sur la face de la pièce, opposés aux zones les moins déformables (fig. 10.45).

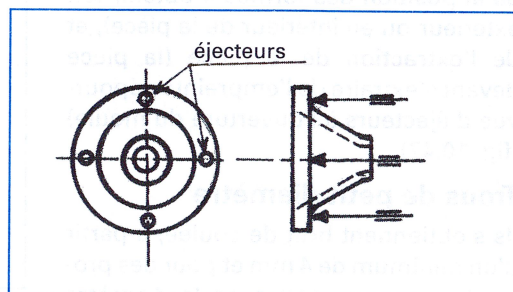


FIGURE 10.45 Position des éjecteurs sur une pièce.

Matériaux

Les moules devraient pouvoir conserver leurs caractéristiques mécaniques sous une température relativement élevée (jusqu'à 500 °C pour certains éléments).

On utilisera principalement les aciers 35 NC D 16, 30 CD 12, 30 NC 11, Z 10 NC S 19-15, et la fonte grise lamellaire perlitique.

Pièces obtenues

Les pièces à couler en coquille sont obtenues avec plus de précision que par la coulée en sable, soit :

Précision dimensionnelle

Elle est déterminée en fonction du matériau et de la grande dimension de la pièce ; elle varie selon la position de la cote considérée dans l'empreinte.

On admet, pour les alliages légers, un intervalle de tolérance minimal de quelques dixièmes de mm ($\approx 0,3$ pour petites pièces). On peut appliquer la formule :

$IT = k_1 + k_2 \times l$, avec $k_1 = 0,2$ à $0,4$; $k_2 = 1,5/1000$ à $2,5/1000$; l cote considérée (contenue dans un, deux ou trois éléments constitutifs du moule) (fig. 10.46).

Surépaisseur d'usinage

Elle se définit en fonction de la plus grande dimension de la pièce, selon les matériaux coulés. Pour les alliages légers, elle varie de 1 à 2,5 mm selon la grandeur des pièces. On applique une formule indiquant cette surépaisseur S en fonction de la plus grande longueur de pièce L , soit : $S = 1 + 3 L/1000$.

Dépouille

Elle est faible (1 à 3°) et varie en fonction de la position des formes à obtenir (en extérieur ou en intérieur de la pièce), et de l'extraction de la pièce (la pièce devant s'extraire de l'empreinte dépourvue d'éjecteurs à l'ouverture du moule) (fig. 10.47).

Trous de petit diamètre

Ils s'obtiennent brut de coulée, à partir d'un minimum de 4 mm et pour des profondeurs en rapport avec le diamètre (de 3 à 6ϕ) avec une dépouille de $0^\circ30$ à 2° , en fonction des diamètres (elle est maxi pour les plus petits diamètres).

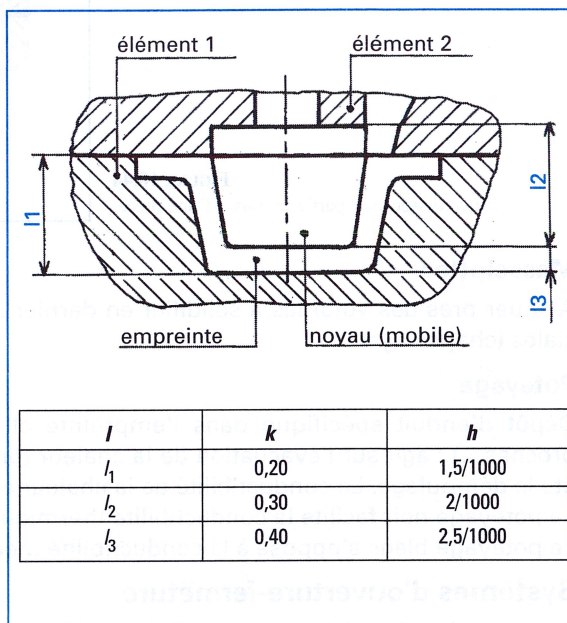


FIGURE 10.46 Données pour déterminer la précision dimensionnelle minimale des pièces coulées en coquille.

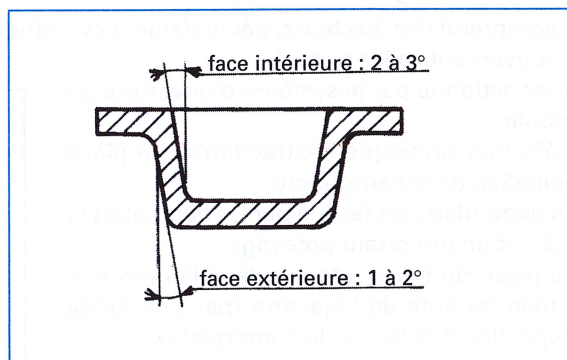


FIGURE 10.47 Dépouilles sur les pièces coulées en coquille.

Utilisation

En production de petites séries répétitives, pour des pièces de dimensions petites à moyennes, en alliages d'aluminium et de cuivre.

3.3 Moulage sous haute pression

Procédé de moulage en moule permanent dont l'outillage, métallique, est en deux parties. L'alliage en fusion est injecté sous pression dans l'empreinte, en un temps très court (1/10 de seconde) avec une surpression sur l'alliage coulé pour compenser le retrait de solidification. Le moulage s'effectue avec des machines spécifiques à ouverture-fermeture horizontale où toutes les opérations sont automatisées : production de grande série (10 000 pièces minimum à plusieurs millions).

Moule

Il est constitué de deux blocs (en acier) fixés l'un sur un plateau fixe (coté injection de l'alliage), l'autre sur un plateau mobile (côté éjection de la pièce) (fig. 10.48).

À la fermeture du moule, les blocs sont centrés l'un par rapport à l'autre (goujons...); leur maintien en position fermée doit être efficace (par vérin de manœuvre...).

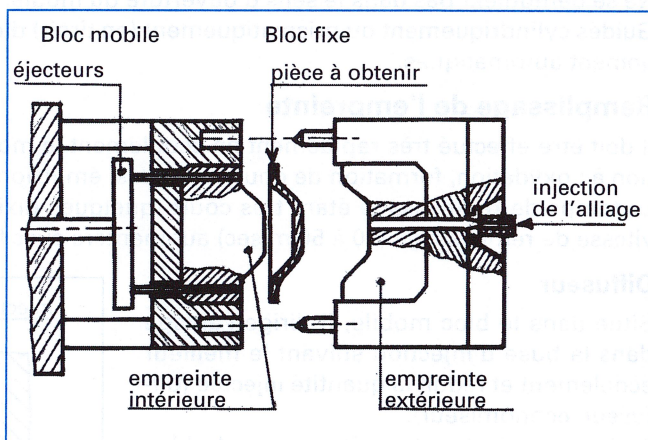


FIGURE 10.48

Schéma du poste de moulage de machine à moule haute pression.

Bloc fixe

Carcasse recevant l'empreinte (ou une grande partie) de formes extérieures de la pièce à obtenir.

Bloc mobile

Carcasse recevant l'empreinte des formes intérieures démoulables dans le sens d'ouverture du moule.

Noyaux et broches

Ils sont fixes ou mobiles, selon leur position dans le moule.

Montés de préférence sur le bloc mobile, facilitant la venue de la pièce (démoulage).

Noyaux et broches fixes

Se démoulent dans le sens d'ouverture du moule.

Amovibles pour un remplacement périodique (fortes sollicitations thermiques et mécaniques) (fig. 10.49).

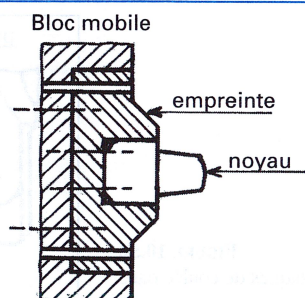


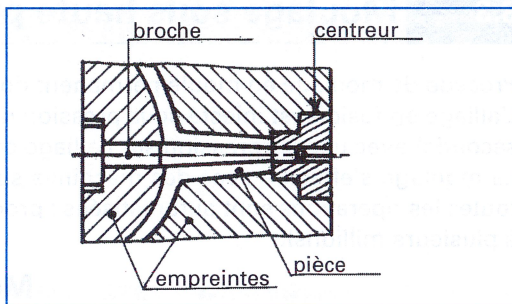
FIGURE 10.49

Noyau dans une empreinte de moule haute pression.

Broches très longues. Sont maintenues en position dans le demi-moule opposé (fig. 10.50).

FIGURE 10.50

Broche longue dans un moule haute pression (maintenue dans les deux empreintes).



Noyaux et broches mobiles

Ne se démoulent pas dans le sens d'ouverture du moule.

Guidés cylindriquement ou prismatiquement (en tiroir) dans le bloc : positionnement et dégagement automatiques.

Remplissage de l'empreinte

Il doit être effectué très rapidement en écoulement le moins turbulent possible pour opposition à : oxydation, formation de gouttes froides, émulsion air-alliage.

Le temps de remplissage étant très court (quelques dixièmes de seconde au maximum) la vitesse de remplissage (20 à 50 m/sec) augmentera avec le minimum de toile de la pièce.

Diffuseur

Situé dans le bloc mobile, il dirige l'alliage dans la buse d'injection suivant le meilleur écoulement et réduit la quantité injectée (diffuseur, économiseur).

La buse d'injection est située dans le bloc fixe.

Le refroidissement du diffuseur et de la buse d'injection est nécessaire (circulation d'eau) (fig. 10.51).

Attaque de coulée

Elle assure l'écoulement de l'alliage et régule la vitesse de remplissage de l'empreinte.

Elle est située, en principe, au droit des parties minces à couler.

Une partie épaisse peut avoir son attaque spécifique ou plusieurs attaques (remplissage de deux côtés d'un noyau) (fig. 10.52).

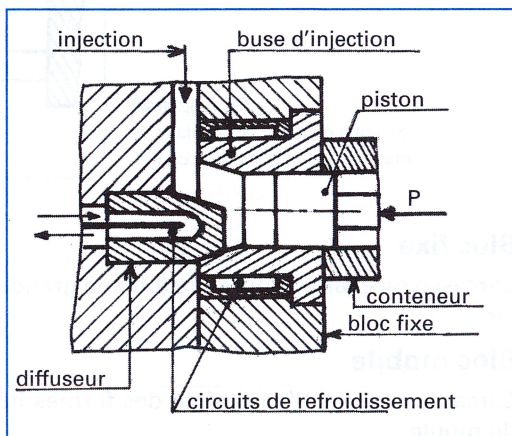


FIGURE 10.51 Schéma de diffuseur pour moule haute pression (en chambre froide).

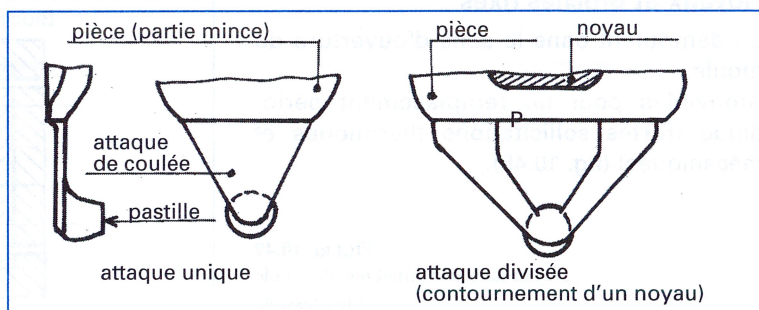


FIGURE 10.52

Attaques de coulée dans moule haute pression.

Une seule attaque est préférable pour les alliages d'aluminium (évite l'oxydation). La hauteur de l'attaque est fonction de l'épaisseur de la toile des pièces à obtenir (2 à 3,5 mm pour pièces en alliages d'aluminium, 0,5 à 1,5 mm pour pièces en zamak).

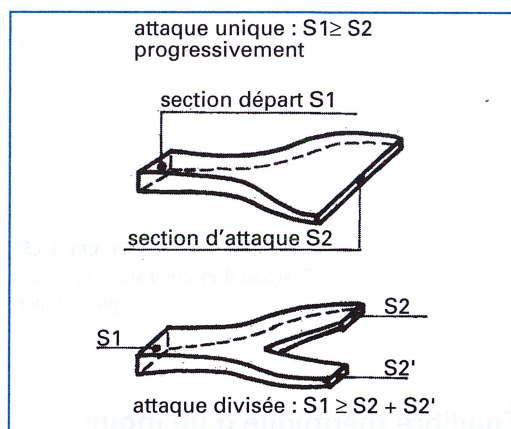
Canal de coulée

Assure le remplissage sans perte de pression de la carotte à l'empreinte, d'où la condition : section de départ du canal $\geq$ section de l'attaque (fig. 10.53).

Les canaux de coulée des moules utilisés sur machines de moulage à chambre chaude sont directs : réduction du temps de remplissage et de l'oxydation de l'alliage.

FIGURE 10.53

Canaux de coulée pour moules haute pression.



Dégorgeoirs, ou talons de lavage

Situés en opposition à l'attaque, ou contre des parties minces de la pièce : assurent le réchauffage localisé du moule et reçoivent les premières veines de l'alliage souillé d'oxydes et de gouttes froides.

Tirages d'air

Obtenus par : le jeu des assemblages mobiles du moule (noyaux, broches...) ; éventuellement, une saignée sur une face de joint du moule, à la suite du dégorgeoir.

Alimentation

Assurée, après remplissage, par la pression du piston d'injection sur l'alliage, durant sa solidification dans le moule.

La réserve d'alliage, carotte ou pastille, se situe dans la buse d'injection (du bloc fixe).

Système d'ouverture-fermeture-éjection

Ces mouvements sont effectués automatiquement et rapidement par un vérin.

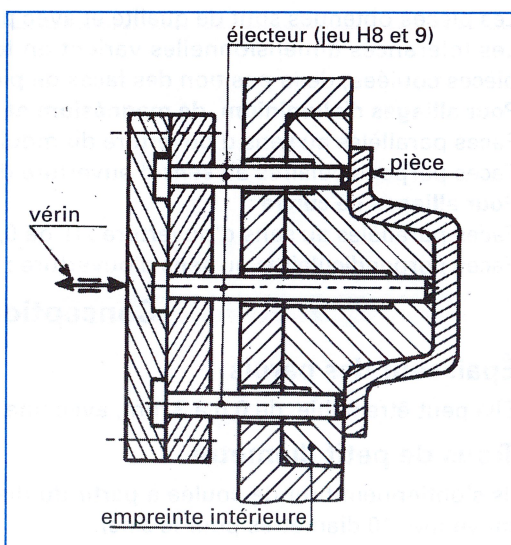
Éjection de la pièce

Elle est obtenue, généralement, par des poussoirs (les éjecteurs) guidés par des plaques-supports.

Les éjecteurs de forme cylindriques et de petit diamètre (2 à 10 mm) sont situés avec répartition de l'effort, en face des parties massives de la pièce, du canal de coulée et du dégorgeoir (fig. 10.54).

FIGURE 10.54

Système d'éjection de pièce dans moule haute pression.



L'éjecteur est circulaire autour d'un pivot, sur une face de faible épaisseur (fig. 10.55).

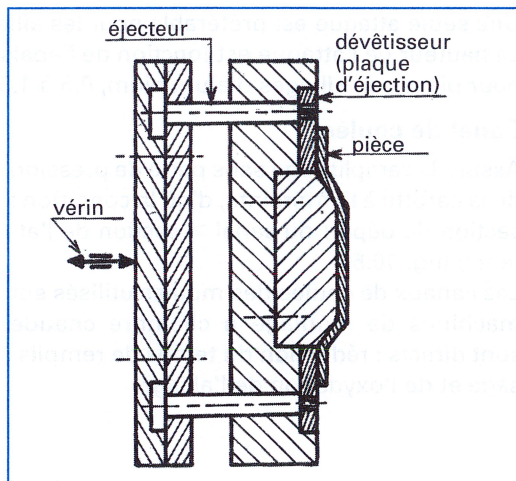


FIGURE 10.55

Système d'éjection surfacique pour pièce mince.

Équilibre thermique d'un moule

Il est stabilisé lorsque, dans le cycle de production, la température de l'alliage s'équilibre avec celle dissipée dans le moule (évacuée par le refroidissement de l'eau additionnée d'un conducteur thermique).

Matériaux

L'utilisation permanente des moules (production continue) implique des matériaux de construction ayant les caractéristiques pour résister aux fortes contraintes thermique et mécanique.

On utilise des aciers alliés, tels que :

Moulage des alliages d'aluminium, de magnésium, de zinc : utiliser la nuance Z 35 CDVS 05.

Moulage d'alliages de cuivre : utiliser la nuance Z 35 KWC 05-04.

Plateaux supports du moule : en acier de nuance 25 CD4 à 42 CD4.

Précision

Les pièces obtenues sont de qualité et avec précision de répétabilité.

Les tolérances dimensionnelles varient en fonction : des dimensions et des matériaux des pièces coulées ; de la position des faces de pièce dans l'empreinte. On admet :

Pour alliages d'aluminium, de magnésium et de zinc :

Faces parallèles au sens d'ouverture du moule : IT de 0,05 à 0,4 mm.

Faces perpendiculaires au sens d'ouverture du moule : IT de 0,10 à 0,8 mm.

Pour alliages de cuivre :

Faces parallèles au sens d'ouverture : IT de 0,07 à 0,60 mm.

Faces perpendiculaires au sens d'ouverture : IT de 0,20 à 1,00 mm.

Conception des pièces

Épaisseur des parois

Elle peut être faible, de 0,5 à 3 mm, avec une dépouille de $0^{\circ}30$ à $1^{\circ}30$ (fig. 10.56).

Trous de petit diamètre

Ils s'obtiennent brut de coulée à partir du diamètre 3 mm, profondeur de 2 à 5 diamètres en moyenne (10 diamètres pour le zinc).

Leur dépouille varie de 0°30 à 2°30 en fonction des diamètres (elle diminue avec l'accroissement du diamètre) (fig. 10.56).

Petites pièces

Elles sont coulées en grappes, optimisant le coût du moule et la productivité.

Machines

Elles sont de type horizontal, à chambre chaude ou à chambre froide.

Le moulage est entièrement automatisé (remplissage et alimentation de l'alliage, fermeture et ouverture du moule, éjection de la pièce).

Machines à chambre chaude

Elles comprennent le four de maintien en température de l'alliage, le système de remplissage, la chambre chaude immergée dans l'alliage en fusion. Elles ont une force de fermeture (pression au joint du moule) de 5 à 1 500 tonnes.

Machines à chambre froide

Elles comprennent une chambre (le conteneur) dans laquelle est déversé l'alliage en fusion à chaque injection (par un piston coulissant dans le conteneur). Elles ont une force de fermeture de 50 à 4 000 tonnes.

	Alliages aluminium	Cuivre	Zinc
Parois Dépouille mini : intérieure et extérieure	0°30	1°	0°30
Épaisseur mini : pièce dans cube.			
≤ 30	1	1,5	0,5
30 ≥ 100	1,5	2	1
100 ≥ 200	2	2,5	1,5
< 200	2,5	3	2
Trous Dépouille mini :			
Ø ≤ 5	2°30		1°30
5 ≥ 10	2°	2°	1°
< 10	1°	1°30	0°30
Profondeur maxi :			
Ø = 3	5		20
3 ≥ 10	50	50	100
< 10	Ø × 5	Ø × 5	Ø × 10

FIGURE 10.56 Moulage haute pression : dépouilles et épaisseurs de parois ; dépouilles et profondeurs de trous.

Utilisation

En production de grande série, répétitive ou continue pour des pièces :

- En alliages d'aluminium et de cuivre, avec les machines à chambre froide.
- En alliages de zinc et de magnésium, avec les machines à chambre chaude.

10

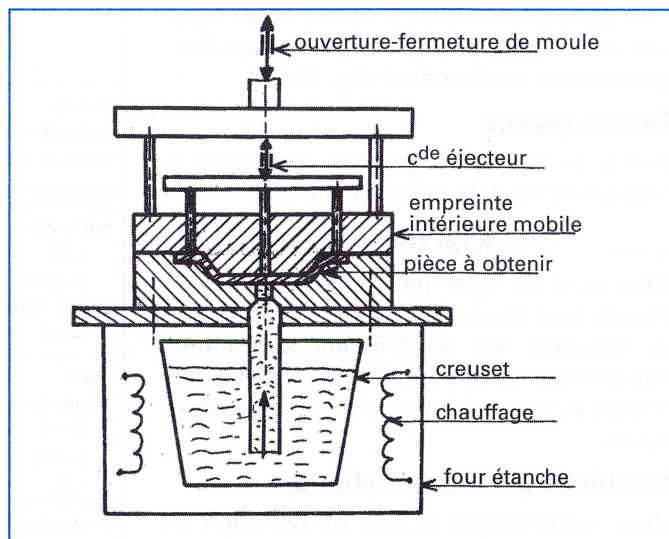
3.4

Moulage sous basse pression

Procédé de moulage en moule permanent où l'alliage en fusion est injecté dans l'empreinte sous une pression de 0,2 à 2 bars (entre le remplissage et le masselottage).

Les différentes pressions, appliquées dans le four, font monter l'alliage dans le tube de liaison creuset-moule remplissant l'empreinte (fig. 57).

FIGURE 10.57
Schéma de principe de machine à mouler basse pression.



Moule

Métallique, situé au-dessus du creuset du four (étanche) de maintien en température.

Les deux blocs constitutifs du moule se séparent au démoulage.

Le démoulage peut être facilité par le dégagement du moule (basculement, rotation...).

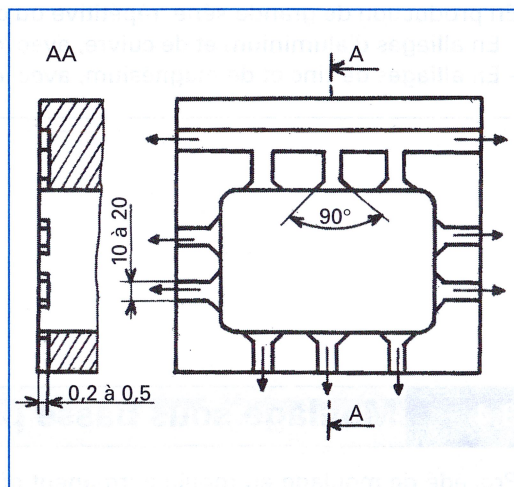
Jeux fonctionnels de l'outillage

Ils sont de quelques dixièmes de mm (plus important qu'en haute pression, la température de régime du moule étant plus élevée).

Tirage d'air

Il est assuré par des rainures peu profondes (0,2 à 0,5 mm) et de faible largeur (10 à 20 mm) sur les joints de chape et portées de noyaux, débouchant à l'extérieur (directement ou par collecteur). Ces rainures sont évasées pour favoriser l'écoulement (fig. 10.58).

FIGURE 10.58
Tirage d'air sur joint de moule basse pression.



Conception

Elle est délicate, pour assurer la direction de la solidification.

Une régulation thermique de certains éléments pourra être nécessaire, à la mise en production.

Remplissage de l'empreinte

Il s'effectue coulée par le bas en source. La pièce doit être située dans le moule, masses en bas, en liaison avec l'attaque de coulée et le masselottage.

Remplissage et masselottage sont de même section (tube de liaison-injection) pour un remplissage non turbulent.

Plusieurs attaques de coulée

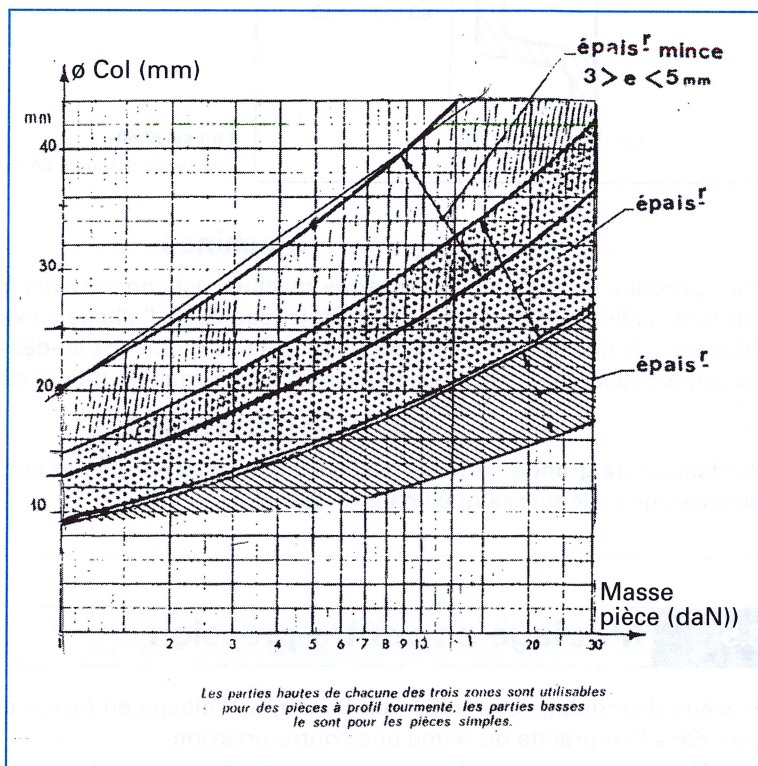
Alimentation d'une partie massive : le temps de remplissage doit être inférieur au temps de solidification de la plus faible épaisseur de paroi.

Le diamètre du col de remplissage (la carotte) est fonction des pièces (poids, épaisseur des toiles, profil) (fig. 10.59).

FIGURE 10.59

Diamètre des cols de remplissage pour moule basse pression.

Doc. l'aluminium français.



10

Matériaux

Ils sont identiques à ceux du moulage sous haute pression.

Précisions

La précision dimensionnelle obtenue est sensiblement inférieure à la coulée sous haute pression.

La mise au mille est excellente, de 1,05 à 1,20 : la masselotte n'est pas solidifiée.

La coulée en source provoque peu d'oxydation et la pression donne une venue de pièce comparable à la coulée en chute.

Conception des pièces

Elles doivent être conçues pour la coulée sous pression, avec une épaisseur progressive de l'attaque à l'extrémité opposée (haut de la pièce) (fig. 10.60).

Elles auront un axe de symétrie (pièces cylindriques) avec une grande surface et une faible épaisseur.

Les alliages utilisés ne doivent pas avoir une tendance à la criquabilité.

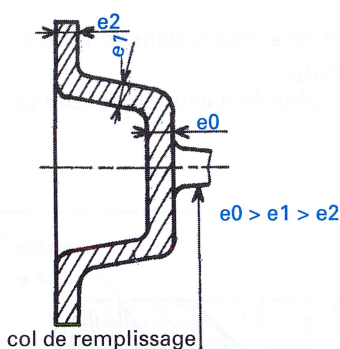


FIGURE 10.60

Épaisseurs des toiles en moulage basse pression.

Machines

Pour produire en grande série, chaque machine est conçue avec four de maintien en température de l'alliage et automatisation totale (coulée de l'alliage à extraction de la pièce). Elles sont de deux types : à injection verticale (le moule est au-dessus du four, avec tube d'injection plongeant dans le creuset) ; à injection oblique (le moule est dégagé du four).

Utilisation

Production de grande série de pièces cylindriques courtes et plates de petites à moyennes dimensions et de masse maximale $\cong 100$ kg.

3.5 Moulage en contre-pression

Procédé de moulage en moule permanent, où l'alliage en fusion est injecté sous basse pression dans l'empreinte où règne une contre-pression.

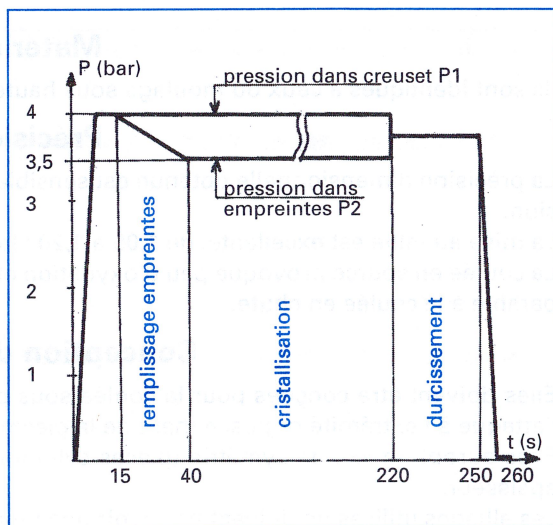
La différence provoquée des pressions opposées permet le remplissage à la vitesse désirée (régulée linéairement et avec rapidité).

Après mise à même pression P_1 du creuset et du moule, la pression dans le moule est abaissée à P_2 , tel que la différence de pression injecte l'alliage en fusion dans le moule.

Après cristallisation de la pièce obtenue, l'équilibre des pressions P_1 et P_2 est rétabli, provoquant le retour au creuset de l'alliage non solidifié (fig. 10.61).

FIGURE 10.61

Cycle des pressions durant le moulage en contre-pression.



Poteyage

Il a une longue durée, la coulée étant effectuée avec le moule moins chaud qu'avec les autres procédés (la compression régulant le remplissage).

Le cycle automatisé de la machine (spécifique) permet une grande productivité.

Précision

Pièces produites avec un faible pourcentage de rebuts et de grandes qualités (régulation du processus de formation et de structuration).

Le masselottage et la section d'attaque de coulée sont réduits.

Matériaux moulés

Tous les matériaux de fonderie sont moulables par ce procédé, à vitesse de coulée d'environ le double de la basse pression.

Les alliages recyclés sont moulables, le degré de pureté de l'alliage étant sans influence sur les caractéristiques mécaniques des pièces obtenues.

Machines

Elles sont entièrement automatisées et de grande productivité.

Le moule et le creuset sont hermétiques, les gaz et les vapeurs sont captés, améliorant les conditions de travail.

Utilisation

Production de pièces moyennes de grandes qualités : métallurgique (faible formation de micro-retassures et de porosité) ; mécanique (résistance à la traction, limite d'élasticité, allongement, dureté).

Avec de nouveaux alliages métal-gaz, le procédé permet de produire des pièces, concurremment aux autres procédés de moulage permanent.

10

3.6 Moulage en centrifugation

Moulage en moule permanent de pièces tubulaires, sans noyautage, avec une mise au mille réduite (remplissage directement dans le moule).

L'alliage en fusion coulé dans le moule (de section cylindrique) est entraîné en rotation. Une accélération est appliquée à l'alliage (de 20 à 40 g) qui se solidifie sur la périphérie intérieure du moule (fig. 10.62).

La quantité d'alliage déversée dans le moule détermine l'épaisseur de la pièce obtenue. Éventuellement, un trop-plein peut recevoir un excès de coulée.

Le masselottage est « partiellement éliminé » ;

Le système de remplissage est simplifié (un déversoir et canal de coulée).

Moule

Généralement métallique et en une pièce, éventuellement en deux demi-coquilles pour démoulage de profils extérieurs non rectilignes.

Selon l'importance de la série et l'alliage à couler, les moules sont :

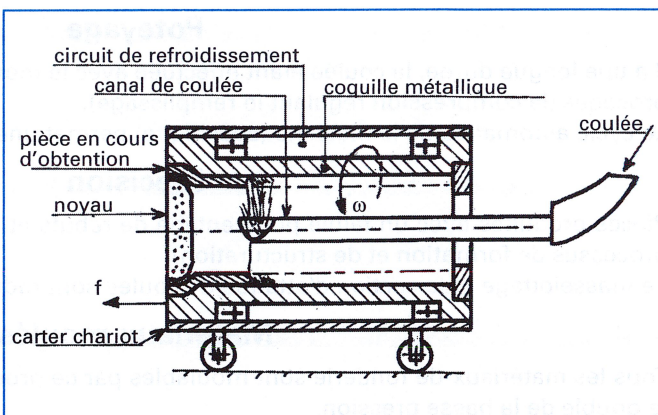


FIGURE 10.62

Schéma de principe du moulage par centrifugation horizontale (pièces longues).

Métalliques

En acier, pour production de grande série.

Ils peuvent être refroidis, par eau ou par air, avec un recuit des pièces obtenues pour annuler l'effet de trempe.

Un moule en acier produira jusqu'à $\approx 4\,000$ pièces; en fonte, la quantité maximale est $\approx 1\,000$ pièces.

En graphite

Pour moulage d'alliages de cuivre, une frette métallique consolidera le moule.

Précisions

La précision de forme est bonne (remplissage en continu dans l'empreinte).

L'ébarbage et un usinage éventuel de finition sont réduits.

Métallurgie. Structure affinée (gradients de température autour du moule); excellente compacité (centrifugation); ségrégation centralisée des oxydes et impuretés (faible masse volumique).

Noyautage

Un noyau cylindrique court, en sable, peut être placé à une extrémité de pièce (fig. 10.62).

Machines

À axe vertical ou oblique

Production de pièces courtes (diamètre $\approx$ hauteur).

Les pièces courtes de grand diamètre sont coulées avec machine à axe vertical (fig. 10.63).

Les pièces coulées avec machine à axe oblique ont l'intérieur en forme parabolique.

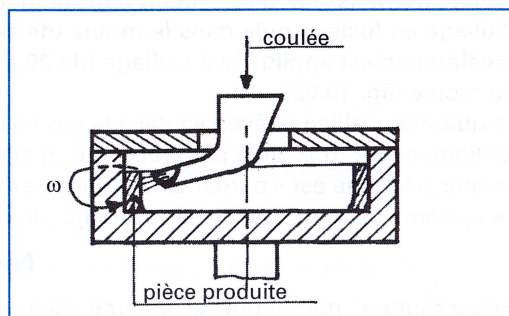


FIGURE 10.63 Schéma de principe du moulage par centrifugation verticale (pièce courte, de grand diamètre).

À axe horizontal

Production de pièces longues (plusieurs mètres).

Ces machines ont deux mouvements de génération (rotation du moule et translation axiale).

Utilisation

Production de pièces moulées de section cylindrique, courtes et longues, en alliage à forte masse volumique de préférence (vitesse de rotation du moule non excessive).

Des pièces en alliages composites sont réalisables par coulée de couches successives (sous-couche précédente solidifiée).



4. Moulage par compression des poudres et frittage

4.1 Généralités

Les poudres métalliques sont comprimées dans un moule, puis frittées par chauffe du comprimé (la pièce) sous vide ou à atmosphère contrôlée, d'une température inférieure à celle de fusion de l'élément principal.

4.2 Poudres métalliques

Elles sont généralement obtenues par atomisation avec un jet fluide (gaz, azote...) attaquant le métal qui éclate et se refroidit en gouttelettes formant des grains de poudre d'excellente compressibilité (fig. 10.64).

Désignation

Elles sont définies, selon la normalisation, par leurs principales caractéristiques, densité apparente, vitesse d'écoulement, granulométrie, compressibilité, et d'autres caractéristiques telles que : composition chimique, expansion, résistance à vert...

Leur désignation est normalisée (NF A-95-711) par F C Z- A B-m (fig. 10.65).

Densité apparente

Densité d'une poudre non tassée ; elle permet de déterminer la quantité de remplissage des moules (ou matrices) et se définit par : poids de poudre/son volume non tassé.

Résistance à vert

Résistance de la poudre comprimée ; elle permet de déterminer l'aptitude à la manutention des pièces après compression (et avant frittage).

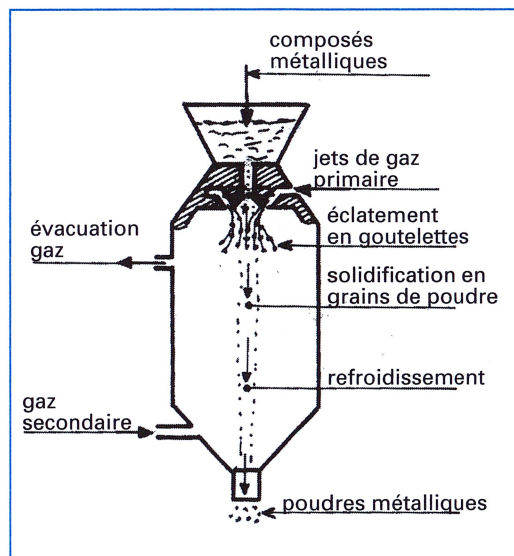


FIGURE 10.64 Schéma d'obtention des poudres métalliques par atomisation.

FIGURE 10.65 Désignation des matériaux frittés.

F - C - Z - A, B... m	
F -	Méthode de fabrication
F :	Frittage
Fj :	Frittage avec infiltration
C -	Centième de %. Teneur en carbone
C :	Pour acier non allié
Cg :	pour graphite
Z -	Élément de base et teneur
À, B... %	Éléments d'addition et teneur
Fe	Par ordre de teneur décroissante non indiquée pour alliages ferreux
m × 10 :	Classe de masse volumique

Porosité

La poudre comprimée est poreuse, ce qui permet de produire des pièces très fonctionnelles (autolubrification, infiltration...)

Pour utilisations spécifiques, cette porosité est utilisée en y infiltrant un liquide ; éliminée par une phase de forgeage.

4.3 Caractéristiques des pièces

Les pièces compressées-frittées, constituées dans un alliage (ou pseudo-alliage) bien défini, ont comme caractéristiques :

Caractéristiques mécaniques

Résistance à la rupture

Par rapport au métal non fritté R_o , on a la relation pratique :

$R = R_o / 100 \cdot (100 - 2p)$ (exemple fig. 10.66), avec p = porosité en % du volume fritté.

La résistance à la rupture diminue avec l'augmentation de la porosité (exemple fig. 10.66).

Pression de compactage	Fritté	Fritté, trempe maturation	Fritté, trempe revenu
0,8	24,5	30,5	36
1,3	29,2	35,6	46,8
3	30,3	38	49,2

FIGURE 10.66 Exemple de variation de résistance à la rupture par traction d'une poudre d'aluminium.

Allongement à la traction A %

Il augmente avec la résistance à la rupture et diminue avec l'augmentation de la porosité. Sa valeur est très faible : 1 à 3 % pour les alliages, 10 % maximum pour les métaux purs.

Dureté

Caractéristique principale pour mesurer la résistance à l'usure (avec les essais normalisés, Rockwel en particulier, Vickers).

L'essai Rockwel permet de contrôler les pièces traitées et non traitées, de toutes densités.

L'essai Vickers s'effectue sur pièces traitées de densité élevée.

Résistance à la fatigue

Elle est d'un rapport de 40 % environ avec la résistance à la traction (pratiquement analogue aux métaux non frittés).

Précisions

Les précisions dimensionnelles et l'état de surface varient selon la gamme de fabrication.

Dimensions

On obtient les qualités : 13 à 10 aux cotes parallèles au sens de compression ; 9 à 7 avec calibrage des formes, aux cotes perpendiculaires au sens de compression, dont les trous ; 9 à 13 pour les entraxes.

État de surface

De 0,8 à 6,4 Ra en frittage simple et 0,4 à 0,8 Ra avec calibrage.

Dimensions

Elles sont limitées aux capacités actuelles des machines.

On admet :

Section. Limitée par la pression de compression (généralement de 4 à 6 tonnes/cm²) ce qui nécessite des presses très puissantes.

Hauteur. Limitée par la hauteur de la matrice et la course de presse qui comprime la poudre et éjecte le comprimé ; on admet actuellement ≈ 50 mm maxi de hauteur pièce. Le volume et le poids maxi de pièces à produire sont définis, connaissant la puissance-machine.

Formes

Elles sont à définir en considérant que la poudre, durant la compression, s'écrase sans s'écouler (fig. 10.67).

Pièces percées

Les trous et alésages seront lisses, sans gorge intérieure (fabrication impossible).

Conditions minimales conseillées :

Diamètre des trous 2 mm ; entraxe des trous 3 mm.

Distance aux parois $d \geq h/10$, avec d mini 2 mm et h = hauteur de la forme.

Fond de trou borgne à distance $h_2 \geq h/5$ de la face opposée, avec h_2 mini 2 mm.

Profondeur des lamages $p \geq h/4$, avec h = hauteur de la forme coaxiale et dépouille mini 7°.

Trous polygonaux sans angles vifs ; rayon de raccordement $r \geq 0,5$.

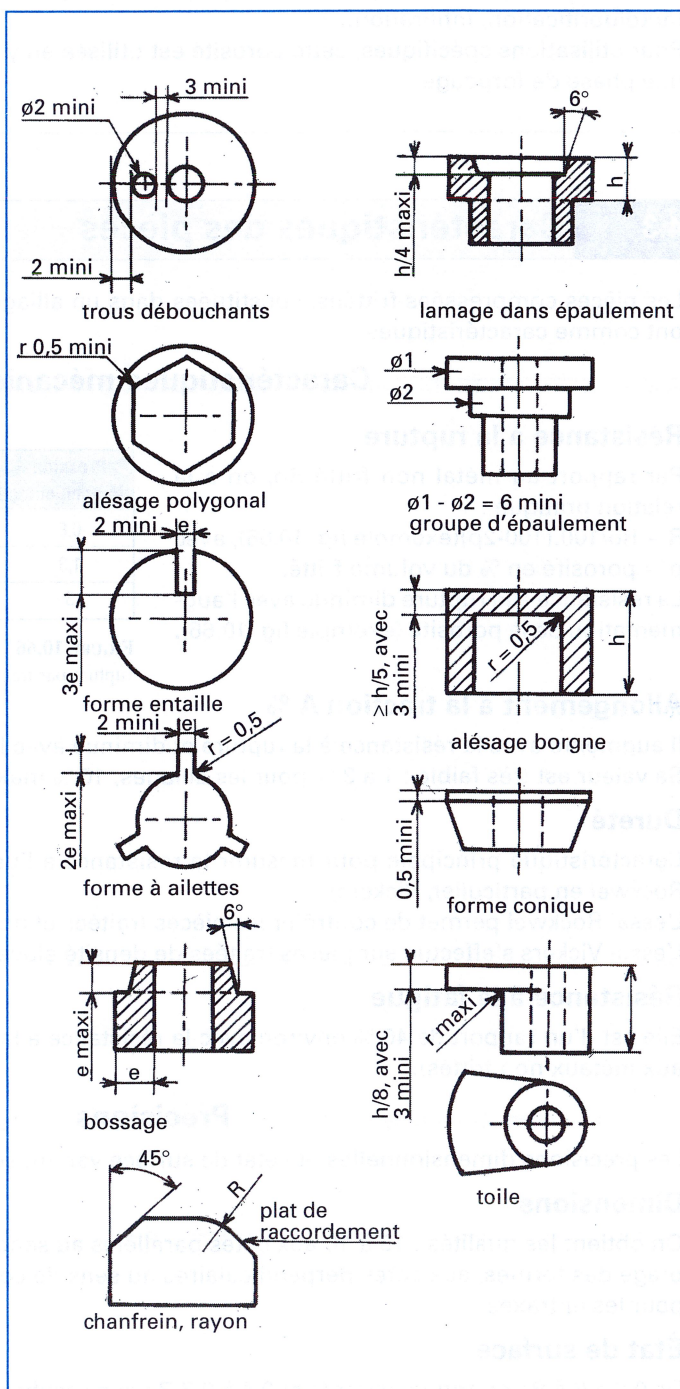


FIGURE 10.67 Conception de pièces à obtenir par compression des poudres.

Pièces épaulées

Limiter le nombre d'épaulements successifs, avec une différence ≥ 3 mm entre parois : (différence des diamètres successifs ≥ 6 mm).

Hauteur d'un bossage $d \leq 1,2 e$, avec e = épaisseur de la paroi de l'épaulement avec 2 mm mini et dépouille 7° .

Pièces avec une toile

Épaisseur de toile $e \geq h/10$, avec e mini 2 mm.

Situer la toile d'un côté du bossage et raccorder par un rayon r mini $\geq 0,5$ mm.

Pièces avec ailettes

Épaisseur des ailettes $e \geq l/2$, avec l = longueur ailettes et e mini 2 mm.

Pièces avec entailles, rainures

Largeur des entailles et rainures $e \geq p/3$, avec p = profondeur des entailles et e mini 2 mm.

Pièces coniques

Grand diamètre situé impérativement côté du poinçon supérieur et à terminer par un cylindre court $\geq 0,5$ mm.

Pièces plates

De préférence, remplacer les angles vifs par un chanfrein (à 45°) ou un arrondi ($r \geq 0,5$ mm); plans inclinés à terminer par un chanfrein ou de préférence un méplat de 0,1 mm mini.

4.5

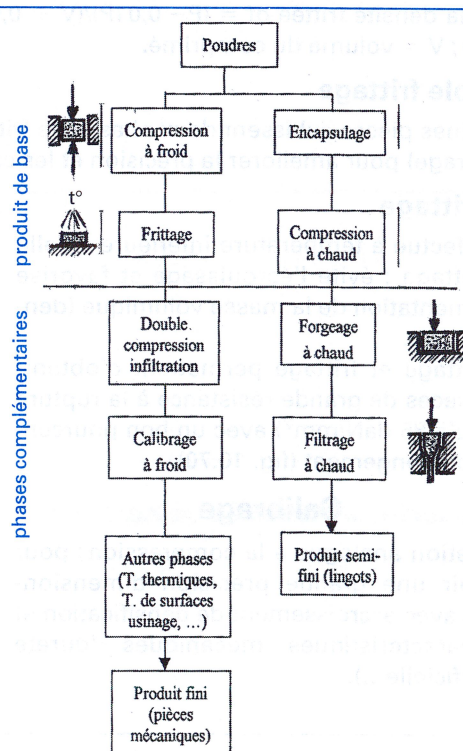
Mise en œuvre

La fabrication des poudres comprimées s'effectue suivant différentes phases, en fonction des pièces à obtenir : produit semi-fini; produit fini et d'utilisation spécifique (fig. 10.68).

Les principales phases sont : mélange, compression à froid et à chaud, frittage, calibrage à froid, forgeage à chaud, filage à chaud, extrusion; et d'autres phases spécifiques (traitements thermiques, traitement de surface, usinage).

FIGURE 10.68

Différentes phases de production en compression des poudres.
(D'après revue *Sciences et techniques*)



Mélange

Association de différents matériaux avec un lubrifiant adapté.

Les alliages pour pièces mécaniques sont constitués de fer additionné de cuivre, de carbone, de nickel, de molybdène (normalisés NFA 95-712, etc.)

Le lubrifiant (cire micronisée, stéarate de zinc) évite le grippage dans le moule.

Compression

Formage du produit (densité à vert), en fonction de la compressibilité de la poudre et de conditions techniques (forme du moule et vitesse de montée en pression) sous une pression moyenne de 6 tonnes/cm² (700 à 800 MPa) lui donnant sa résistance à vert.

Pour obtenir une densification très homogène, l'outillage est à double effet (2 poussoirs opposés) (fig. 10.69).

L'éjection de la pièce s'effectue par le prolongement de la course du poinçon inférieur.

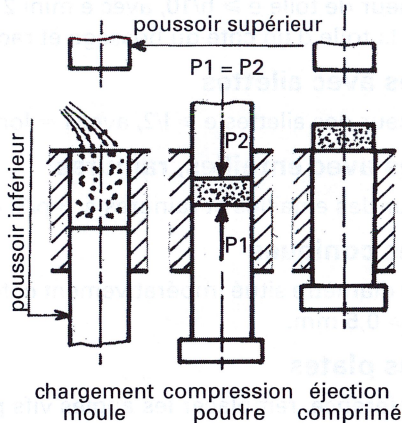


FIGURE 10.69

Schéma de principe de compression de poudre avec presse double effet.

Coefficient de remplissage de la matrice

Il est égal à la densité de la poudre comprimée/densité de la poudre non tassée (aciers $\cong 2,5$). On a la densité frittée $d_f = (P - 0,01P)/(V + 0,003V)$, soit $(P \cdot 0,987)/V$, avec P = poids du comprimé; V = volume du comprimé.

Double frittage

Certaines pièces subissent deux phases de frittage avec une phase de formage intermédiaire (calibrage) pour améliorer la précision et les caractéristiques du produit.

Préfrittage

Il s'effectue à température inférieure à celle du frittage : évite l'écrouissage et favorise l'augmentation de la masse volumique (densité $\cong 7,2$).

Préfrittage et frittage permettent d'obtenir des pièces de grande résistance à la rupture (jusqu'à 85 daN/mm²) avec un bon pourcentage d'allongement (fig. 10.70).

Calibrage

Opération analogue à la compression ; pour obtenir une grande précision dimensionnelle, avec accroissement de densification et de caractéristiques mécaniques (dureté superficielle...).

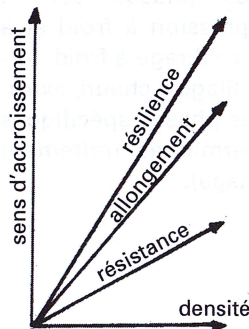


FIGURE 10.70 Schéma d'évolution des caractéristiques mécaniques des pièces frittées-forgées.

Forgeage

Obtention de pièces sans bavures avec : porosité éliminée, résilience, ductibilité et ténacité augmentées ; précision de poids.

Usinage

Réalisation de formes impossibles à obtenir par compression (perpendiculaires au sens des poinçons) ou des surfaces très précises (rectification).

Ébavurage éventuel pour éliminer de légères bavures issues d'un jeu dans l'outillage, par vibrations (shot penning).

Traitements thermiques

Éventuellement on effectue :

La trempe à cœur, par induction, à haute fréquence, par oxydation. Elle ne doit pas s'effectuer en bain de sel (inclusion dans les pores).

La cémentation gazeuse, la carbonitruration.

Le revenu pour pièces fragiles améliorant la résistance à l'usure.

Traitement de surface

Par dépôt électrolytique, pour protection contre la corrosion (couche de zinc et cadmium) avec effet décoratif (couche de chrome et nickel).

Application sur des pièces denses, pour éviter la pénétration d'électrolyte dans les pores (en obstruant les pores, avec une préparation de résines époxydes...).

Poudres d'aluminium et ses alliages

Compression

Elle s'effectue sous faible effort.

Le coefficient de remplissage est de 1,5 à 1,9 ; la densité à vert après compression de 2,3 à 2,6 (bonne rigidité pour la manipulation des pièces).

La résistance à la traction (de 25 à 70 daN/mm²) croît avec la pression de compression et selon les phases de fabrication (fig. 10.66).

Frittage

Il s'effectue sous différentes atmosphères de chauffe (azote, vide, air, ammoniac cracké en particulier) à une température de 600 à 650 °C, selon les poudres.

La chauffe est rapide (bonne conductibilité thermique, et le refroidissement s'effectue à l'air ou à l'eau).

Calibrage

Il s'effectue à froid, sous 2,5 à 5 tonnes.

Forgeage

Il s'effectue à chaud, de 200 à 400 °C selon le matériau (améliore les caractéristiques mécaniques).

Traitements thermiques

Appliqués aux pièces frittées : trempe et maturation, trempe et revenu.

Il est à double poinçon ou à poinçons multiples, selon le type de pièces à produire.

Outillage à double poinçon

La matrice est maintenue sur une semelle, par frettage, ce qui lui donne une précontrainte nécessaire pour les efforts appliqués en production de grande série (fig. 10.71).

Elle est en acier rapide, acier inoxydable, carbure (grande série).

La semelle, en acier 35 NC 16 généralement.

Les poinçons sont du même matériau que la matrice.

Le poinçon supérieur a une longueur suffisante pour assurer l'éjection du comprimé.

Les éléments mobiles (poinçons, broche) ajustés glissant juste, sont à lubrifier au graphite pour éviter la souillure de la poudre à comprimer.

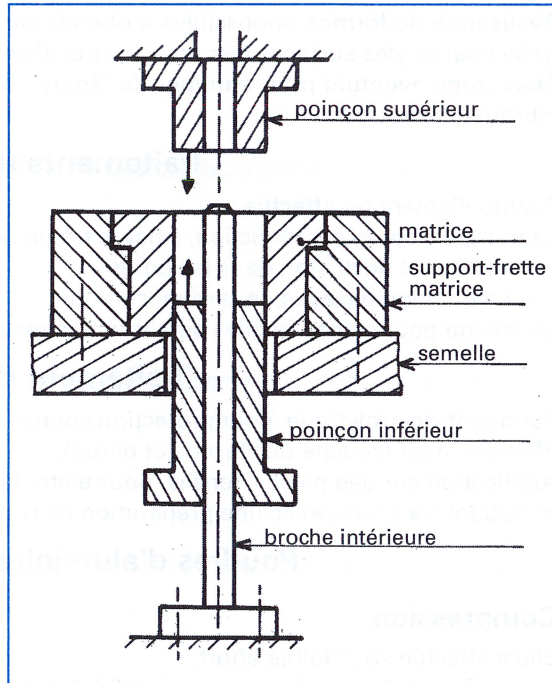


FIGURE 10.71

Schéma d'outillage double poinçon de moulage par compression des poudres.

Pièces obtenues, avec outillage à double poinçon

Elles sont généralement de section constante ou conique, soit :

Longues pleines, d'une longueur maximale égale à 5 diamètres de la pièce.

Longues creuses, d'une longueur maximale de 20 épaisseurs de paroi (épaisseur de paroi supérieure à 1 mm).

Plates, avec une épaisseur minimale de 2 mm et des profils quelconques. Ces différents types de pièces sont réalisables avec un ou plusieurs trous.

Outillage à poinçons multiples

Pour la production de pièces comportant plusieurs épaisseurs (fig. 10.72).

Pour obtenir la densification homogène, la quantité de poudre doit être répartie avant compression, ce qui nécessite un poinçon inférieur spécifique.

Poinçon inférieur. Modulaire, avec des hauteurs différentes réglées pour la compression à obtenir, en fonction du coefficient de remplissage (acier = 2,5).

Pour la production de certaines pièces, des poinçons supérieurs multiples peuvent être nécessaires.

Pièces obtenues avec outillage à poinçons multiples

Elles sont généralement de type prismatique à épaulement, avec des profils de forme en L, T, Z, U, quelconque (fig. 10.73).

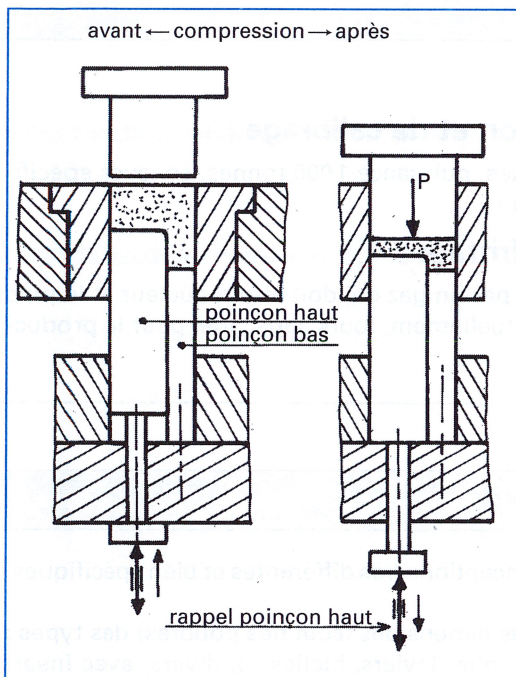


FIGURE 10.72 Schéma d'outillage multipoinçons pour moulage pièces à plusieurs épaisseurs.

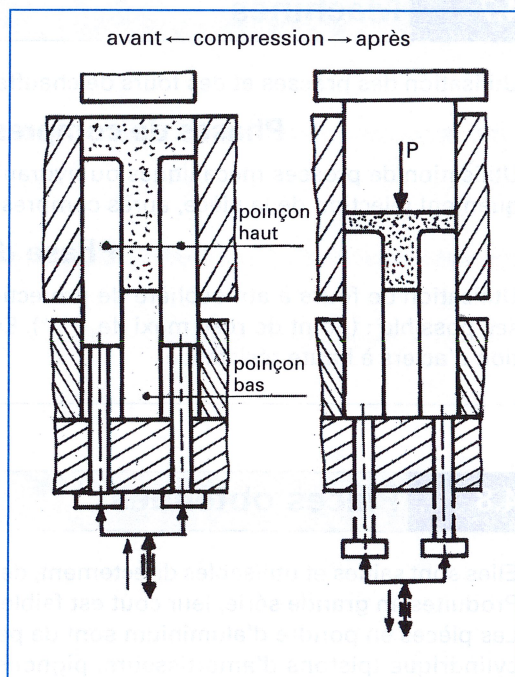


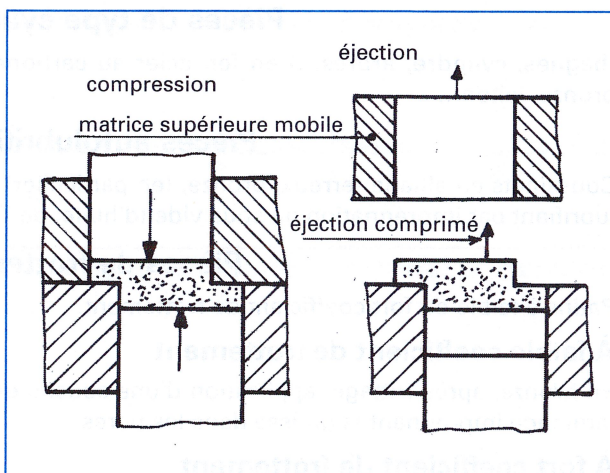
FIGURE 10.73 Schéma d'outillage multipoinçons de pièces en T avec épaulement long.

Pièces frittées de section non continue

Elles sont réalisables à l'aide d'une matrice mobile transversalement, permettant l'éjection sur presse spécifique (système OLIVETTI) (fig. 10.74).

FIGURE 10.74

Matrice avec élément mobile transversalement pour pièces à section non continue.



Utilisation des presses et des fours de chauffe.

Phases de compression et de calibrage

Utilisation de presses mécaniques ou hydrauliques, puissance 1 000 tonnes, conçues spécifiquement (éjection de la pièce, après compression).

Phase de frittage

Utilisation de fours à atmosphère de protection, par un gaz qui doit être réducteur et le plus sec possible : (point de rosé maxi de $+ 2^\circ$). Éventuellement, fours sous vide, pour la production d'aciers à haute résistance.

Elles sont saines et utilisables directement, de conceptions très différentes et bien spécifiques. Produites en grande série, leur coût est faible.

Les pièces en poudre d'aluminium sont de petites dimensions (coût des poudres) des types : cylindrique (pistons d'amortisseurs, pignons...), plat (leviers, bielles...), divers, avec insert métallique éventuel.

Les pièces en poudre d'acier sont de types divers : cylindriques, plates, de forme quelconque, de petites dimensions en général.

Pièces de type cylindrique

(bagues, cylindre, arbres...) en fer, acier au carbone, alliages fer-cuivre, fer-cuivre-nickel, bronze, laiton...

Pièces autolubrifiantes

Coussinets en alliage ferreux, bronze, (en particulier) avec 20 à 30 % de porosité remplie de lubrifiant par imprégnation ou sous vide (d'huile, de Téflon).

Pièces de frottement

Patins à faible ou fort coefficient de frottement.

À faible coefficient de frottement

En bronze, après frittage, application d'une couche de graisse au bisulfure de molybdène et laminage imprégnant la graisse dans les pores.

À fort coefficient de frottement

La poudre comprenant des métaux et des produits abrasifs est fixée sur un support (tôle d'acier) par frittage sous pression.

Les pièces obtenues sont : plaquettes de frein, d'embrayage, patins de guidage de mobiles (glissières de machines...).

Pièces de filtrage

Avec porosité de 30 à 50 % selon les matériaux utilisés. On utilise le bronze (en poudre sphérique, frittée directement sous compression), l'acier inoxydable (résistance à la corrosion, aux acides et aux composés de chlore humide) (fig. 10.75).

FIGURE 10.75
Matériaux utilisés en fabrication par
compression des poudres pour éléments
filtrants.

Matériaux	Densité	Porosité	Produits
Bronze	4,5 à 5,5	40 à 50 %	Tubulaires et bandes
Inoxydables	4,6 à 5,6	30 à 45 %	Tubulaires et bandes
Nickel	4 à 5	45 %	Tubulaires
Titane	2,8 à 3,3	27 à 38 %	Tubulaires et bandes

Elles sont de type tubulaire (cylindrique, conique) en bandes découpables aux formes désirées, pour filtration de liquides et de gaz (sous toutes pressions et toutes températures), soit : séparation de liquide dans un gaz ; diffusion de gaz (gazéification ou échappement) ; effet capillaire (pare-flamme, régulation...) fluidification (manutention de poudres ; plastification de pièces métalliques).

Pièces diverses

Contacts électriques en matériaux conducteurs (tungstène-argent, tungstène-cuivre) ; pièces réfractaires, à base de tungstène et de titane ; pièces en carbure de bore, pour énergie nucléaire ; pièces magnétiques, doux ou durs selon la constitution, à base de fer, fer-nickel, pour masses polaires, noyaux...

Produits bruts

En petits lingots de super-alliages (acier rapide, céramiques...) obtenus par compression isostatique à froid ou à chaud, encapsulage.

11 PROCÉDÉS DE PERÇAGE

1. Différents procédés de perçage	361
2. Perçage par outil de coupe	361
2.1 Généralités	361
2.2 Forets à queue cylindrique	364
2.3 Forets à queue conique	365
2.4 Définition géométrique	366
2.5 Vitesse d'avance	367
2.6 Vitesse de coupe	368
2.7 Puissance nécessaire à la coupe PW	369
2.8 Mise en œuvre des perçages	369
2.9 Centrage des trous en bout d'arbre	370
2.10 Pointage des trous à positionnement précis	372
2.11 Perçage des trous de taraudage	373
2.12 Chambrage des logements des têtes de vis	374
2.13 Ébavurage des trous	376
2.14 Perçage des trous à diamètre relativement grand	378
2.15 Perçage des trous longs	379
2.16 Cycles des perçages	380
2.17 Mouvements de génération	381
2.18 Appareillages porte-outils	382
2.19 Machines de perçage	383
3. Procédés de perçage par érosion	384
3.1 Procédés de perçage au laser	384
3.2 Procédés de perçage par ultrasons	386

1. Différents procédés de perçage

Réalisation de trous en pleine matière avec plus ou moins de précision, à choisir en fonction des conditions technologiques.

Perçage par outil de coupe

Systématiquement utilisé en usinage de l'ensemble des pièces mécaniques réalisées sur machines-outils à outils coupants (tours, fraiseuses, perceuses...).

Poinçonnage

Obtention de trous dans les métaux en feuilles (tôles) en travaux de grande série, avec une bonne précision diamétrale (qualité 9 à 7). Voir chapitre « Procédés de découpe ».

Perçage au laser

Obtention de trous de très petit diamètre, à très grande vitesse (grande série) dans tous matériaux, éventuellement avec peu d'accessibilité.

Perçage par ultrasons

Obtention de trous de très petit diamètre, sans contrainte d'usinage dans des matériaux très durs et cassants.

Perçage au jet d'eau

Obtention de trous de diamètre peu précis, dans tous matériaux. Voir chapitre « Procédés de découpe ».

Perçage au jet plasma

Obtention de trous de diamètre peu précis, dans des matériaux réfractaires. Voir chapitre « Procédés de découpe ».

Nota : les opérations de perçage des pièces mécaniques, de type prismatique, comprennent environ 40 % du temps d'usinage sur les machines à commande numérique.

11

2. Perçage par outil de coupe

2.1 Généralités

Obtention, en pleine matière, des formes cylindriques d'intérieur – les trous – à l'aide d'outils rotatifs de forme – les forets – en une seule passe, pour des diamètres de quelques dixièmes de mm à 100 mm (fig. 11.1).

Ce procédé s'effectue sur toute machine d'usinage par coupe (perceuses, fraiseuses, tours, centres d'usinage et de tournage).

Le mouvement de coupe, circulaire, est donné à l'outil ou à la pièce, selon les machines employées.

Précisions obtenues

Diamétrale. Elle varie généralement de H11 à H9, selon les conditions technologiques (outil, lubrification, matériau travaillé).

État de surface. Il varie entre 3,2 et 1,6 Ra.

Nota. Avec les outils très rigides en carbure, la qualité H8 et l'état de surface 0,8 Ra peuvent être obtenus.

Conception des forets

Les forets ont généralement deux arêtes de coupe avec deux goujures assurant l'écoulement des copeaux et constituant les angles de coupe des outils monoblocs (acier rapide et carbure).

Ils sont monoblocs ou à plaquettes en carbure rapportées (fig. 11.2).

Forets de petit diamètre. Jusqu'au diamètre 12, en général, ils sont monoblocs, en acier rapide ou en carbure.

Au-delà du diamètre 10, ils peuvent être monoblocs (en acier rapide) ou à plaquettes carbure rapportées (brasées ou indexées).

Mise en position et maintien. Effectués par la queue d'outil : cylindrique pour les diamètres jusqu'à 20 en général ; conique, au cône Morse, CM1 à CM6 selon les diamètres ; cylindrique avec tenon d'entraînement (fig. 11.2 et 11.3).

Goujures

Elles peuvent être à hélice « normale » (30°) pour aciers et fontes en particulier ; à hélice longue (15°) favorisant l'écoulement des copeaux fragmentés (matériaux durs, laiton, bronze...) ; à hélice courte (40°) pour copeaux continus (aluminium et ses alliages, cuivre...) donnant un plus grand angle de coupe ; droites pour des outils carbure.

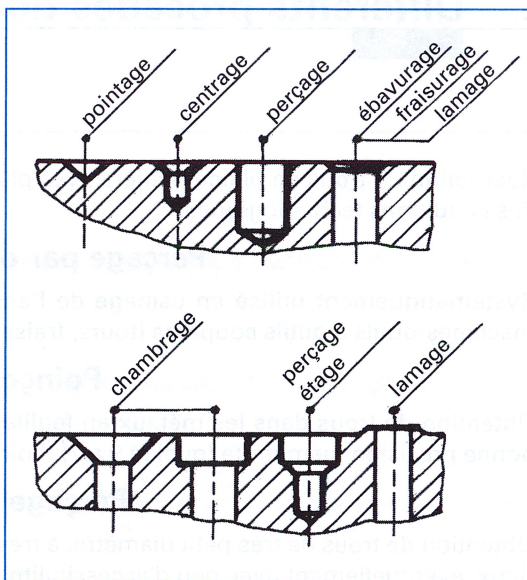


FIGURE 11.1

Différentes opérations de perçage.

FIGURE 11.2

Différents forets en carbure..

1. Embout brasé affutable (*Doc. Sandvik Coromant*)
2. Embout interchangeable, goujure hélicoïdale (*Doc. Seco*)
3. Embout à plaquettes indexables, goujures droites (*Doc. Novex*)



Pointe des forets monoblocs

Par conception ou affûtage, elle peut être amincie : la coupe s'effectuant jusqu'au voisinage du centre, la puissance nécessaire est diminuée et la vitesse d'avance peut être augmentée.

Pointe amincie. La surcoupe est diminuée, elle varie de 0,02 à 0,08 mm (H8-H9) selon les diamètres ; le foret se centre à l'attaque ; le pointage ou le canon de guidage pourront être évités en perçage de trous à positionnement non rigoureux.

Affûtage

Selon les matériaux usinés, l'affûtage des forets diffère, soit (fig.11.4) :

- Pointe non modifiée, pour aciers, métaux non ferreux et plastiques.
- Pointe réduite par amincissement de l'âme, pour tous perçages avec forets de grands diamètres.
- Pointe coupante (affûtage trois pans ou similaires) pour perçages de précision et sous forte avance.
- Réduction angle de coupe, pour matériaux durs (aciers au manganèse, alliages réfractaires,...) ou cassants (bronze...).
- Affûtage deux pans, sur forets à âme épaisse, pour matériaux très durs.
- Arêtes de coupe brisées, pour fonte mal-léable.

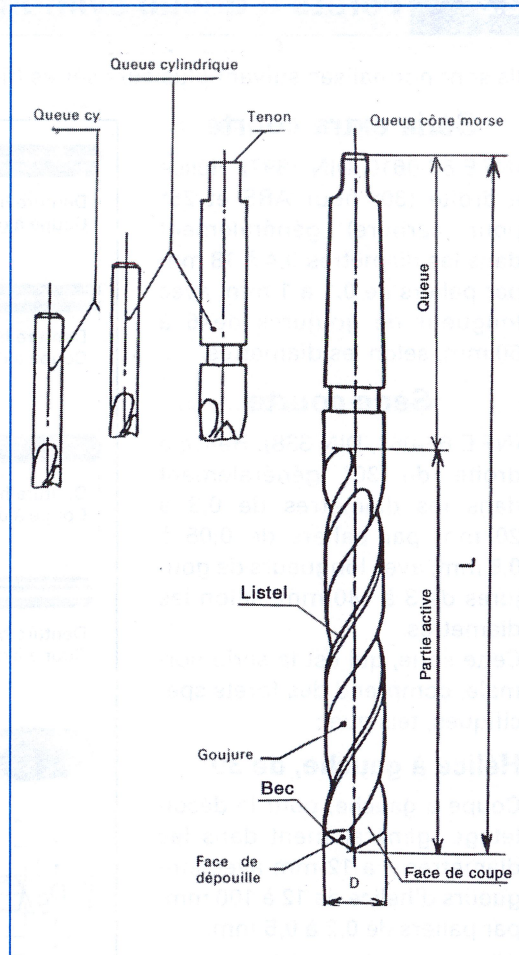


FIGURE 11.3 Foret hélicoïdal monobloc.

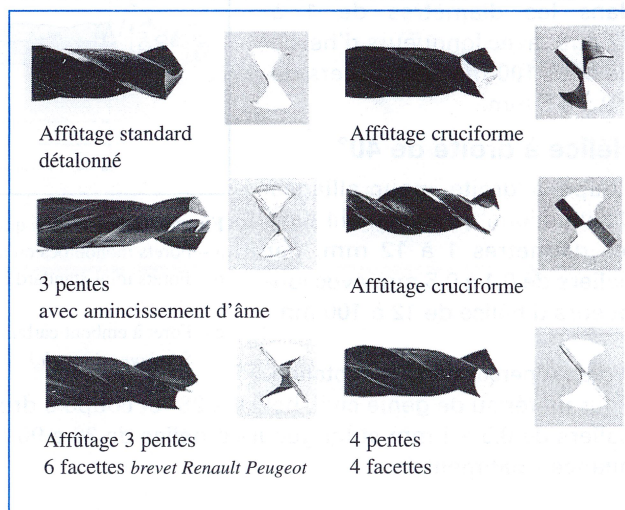
Doc. Leclerc

Nota : Bec des forets à plaquettes carbure, avec un chanfrein be, contribue à une augmentation de la durée de vie de ces forets.

FIGURE 11.4

Différents affûtages des forets hélicoïdaux monoblocs.

Doc. Avyac



2.2 Forets à queue cylindrique

Ils sont normalisés suivant plusieurs séries (fig.11.5).

Série extra courte

(NF E 66-0610, DIN 1897). Hélice à droite (30° pour ARS et 25° pour carbure) généralement dans les diamètres 0,4 à 18 mm par paliers de 0,1 à 1 mm, avec longueur de goujures de 6 à 60 mm, selon les diamètres.

Série courte

(NF E 66-067, DIN 338). Hélice à droite de 30° généralement dans les diamètres de 0,3 à 20 mm par paliers de 0,05 à 0,5 mm, avec longueurs de goujures de 3 à 140 mm, selon les diamètres.

Cette série, qui est la série normale, comprend des forets spécifiques, tels que :

Hélice à gauche, de 30°

Coupe à gauche, pour le décolletage, généralement dans les diamètres 1 à 12 mm avec longueurs d'hélice de 12 à 100 mm, par paliers de 0,2 à 0,5 mm.

Hélice à droite de 15°

Pour les laitons, généralement dans les diamètres de 1 à 12 mm, avec longueurs d'hélice de 12 à 100 mm par paliers de 0,2 à 0,5 mm.

Hélice à droite de 40°

Coupe à droite, pour alliages d'aluminium, généralement dans les diamètres 1 à 12 mm, par paliers de 0,1 à 0,5 mm avec longueurs d'hélice de 12 à 100 mm.

Nota : À percussion avec rotation.

Pour matériau de génie civil, hélice à 28° et coupe à droite, dans les diamètres 3 à 13 mm par paliers de 0,5 à 1 mm et longueurs d'hélice de 30 à 90 mm, avec plaquette brasée en carbure nuance « bâtiment ».

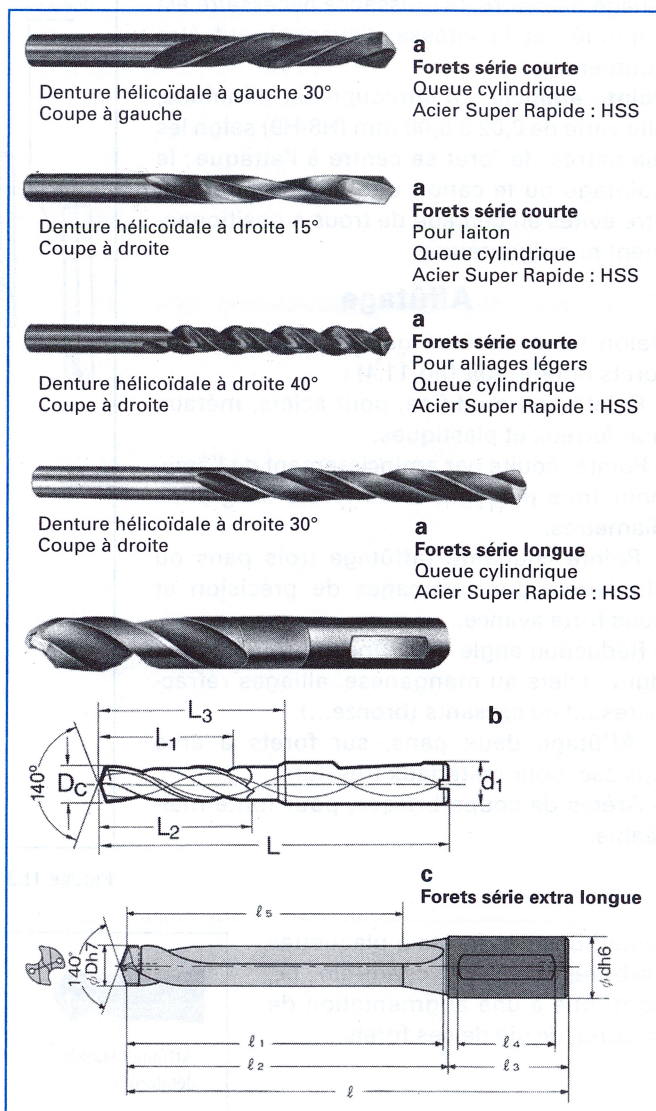


FIGURE 11.5 Forets à queue cylindrique.

a – Forets monoblocs en acier rapide (Doc. Leclerc)

b – Forets mini-standard en carbure revêtu et trous de lubrification (Doc. Novex)

c – Foret à embout carbure, goujures mixtes, trous de lubrification (Doc. Sumitomo-Electric)

Série longue

(NF E 66-068). Généralement dans les diamètres 1 à 30 mm, par paliers de 0,1 à 2 mm, avec longueurs des goujures de 33 à 200 mm.

Usinage des alliages d'aluminium. Les diamètres sont limités à 12 mm en général, par paliers de 0,2 à 0,5 mm avec longueurs de goujures de 30 à 130 mm.

Série extra-longue

(NF E 66-075). Généralement dans les diamètres de 3 à 12 mm avec longueurs de goujures de 120 à 300 mm.

2.3 Forets à queue conique

Ils sont normalisés suivant plusieurs séries, avec queues aux cônes Morse de CM1 à CM6, en fonction des diamètres, soit : (fig.11.6).

Série courte, dite normale

(NF E 66-071), Hélice à droite 30°, généralement de diamètres : 6 à 14 mm avec queue CM1; 14,25 à 23 mm avec queue CM2; 23,25 à 31,75 mm avec queue CM3; 32 à 50 mm avec queue CM4; 51 à 75 mm avec queue CM5; 80 à 100 mm avec queue CM6; par paliers de 0,5 à 5 mm et goujures de 57 à 300 mm, selon les diamètres.

Usinage des alliages d'aluminium : hélice à 40°, de diamètre 10 à 30 mm généralement, avec goujures de 87 à 175 mm selon les diamètres.

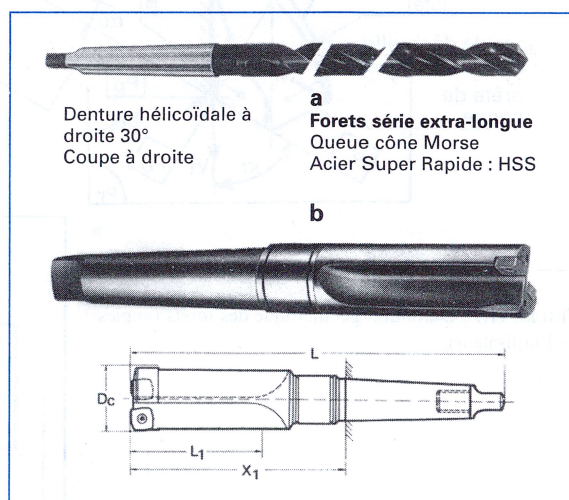


FIGURE 11.6 Forets à queue conique.

a – Forets monoblocs en acier rapide supérieur (Doc. Leclerc)

b – Forets à plaquettes carbure rapportées et trous de lubrification (Doc. Novex)

Série longue

(NF E 66-070). Généralement de diamètres 5 à 14 mm avec CM1; 15 à 22 mm avec CM2; 24 à 30 mm avec CM3; 32 à 50 mm avec CM4.

Série extra-longue

(NF E 66-076). Généralement de diamètres : 6 à 11,5 mm avec CM1; 12 à 23 mm avec CM2; 24 à 30 mm avec CM3; avec des longueurs taillées de 120 à 275 mm (fig. 11.6).

2.4 Définition géométrique

(NF E 66-502) On considère pour chaque partie active, qui comprend une arête de coupe principale, les angles de l'utilisateur, outil en main, avec les directions de coupe et d'avance supposées orthogonales (fig.11.7).

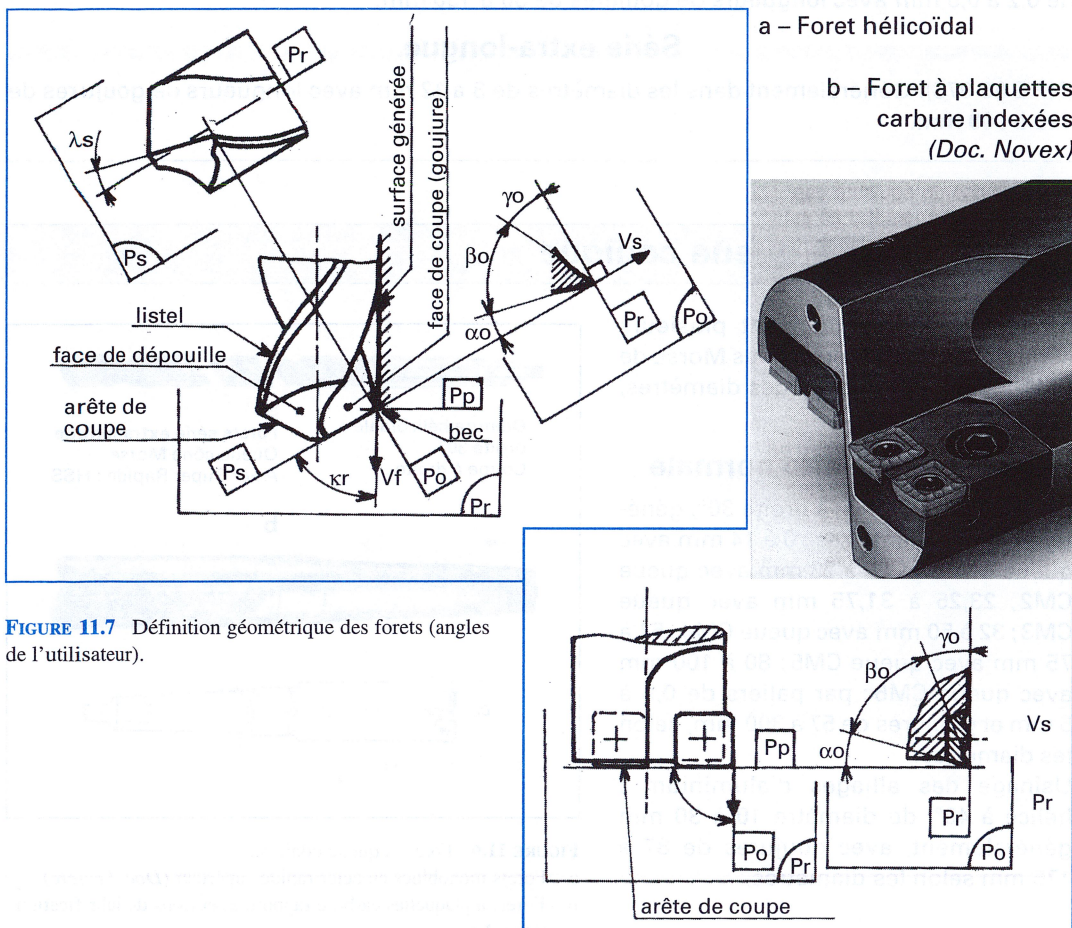


FIGURE 11.7 Définition géométrique des forets (angles de l'utilisateur).

Face de coupe, constituée par la goujure sur laquelle s'évacue le copeau.

Face de dépouille, au regard de la surface travaillée.

Arête de coupe principale, intersection des faces de coupe et de dépouille.

Elle peut être en cuillère ou avec brise-copeaux pour plaquettes en carbure.

Arête de pointe (ou centrale) intersection des faces de dépouille des forets monoblocs.

Angle de pointe ou au sommet δr (delta r), formé par les deux arêtes de coupe, dans le plan Pr .

La pointe peut être conçue ou affûtée de différentes formes pour obtenir : optimisation avance, effort de poussée réduit, non-déviations à l'attaque.

Plan de référence Pr qui passe par l'axe du corps d'outil.

Angle de direction d'arête κ_r (kappa r) formé par le plan d'arête Ps et le plan de travail Pf , dans le plan de référence Pr .

Angle de coupe orthogonal γ_o (gamma o) formé par la face de coupe et le plan de référence Pr , dans le plan orthogonal Po .

Angle de dépouille orthogonal α_o (alpha o) formé par la face de dépouille et le plan d'arête P_s , dans le plan orthogonal P_o .

Angle de taillant β_o (bêta o) de valeur $90^\circ - (\gamma_o + \alpha_o)$.

Angle d'inclinaison d'arête λ_s (lambda s) formé par l'arête de coupe principale et le plan de référence P_r , dans le plan d'arête P_s .

Bec, intersection de l'arête de coupe principale avec le listel : généralement à angle vif ; éventuellement avec biseau β_ϵ (b epsilon) (accroît la durée de vie d'outil : forets de gros diamètre ou à plaquettes carbure).

2.5 Vitesse d'avance

Elles varient selon les matériaux, outil et pièce à usiner et suivant des plages de diamètre des forets. Elle est d'autant plus grande que le diamètre du foret est grand (résistance aux efforts de coupe et de poussée).

Les fortes avances conviennent à la coupe sous lubrification.

Avances par tour f_z

0,02 à 0,80 mm/tr pour les forets en acier rapide (fig. 11.8).

0,01 à 0,80 mm/tr pour les forets en carbure, monobloc et à embout brasé (fig. 11.9).

0,05 à 0,30 mm/tr pour les forets à plaquettes ou embout carbure indexés (fig. 11.10).

Forte avance

S'assurer que l'outil ne talonne pas.

Outils monoblocs. L'angle de dépouille sera relativement grand : évite le talonnage au voisinage du centre de l'outil.

Outils de grand diamètre, à plaquettes carbure indexées. Les dépouilles seront différentes entre les plaquettes (plus grandes sur celles situées en position diamétrale extrême).

Matières à usiner	Vitesses de coupe m/mm	Avances en mm par tour suivant diamètres				Lubrifiants	Type foret
		$\varnothing 2$ à 8	$\varnothing 10$ à 20	$\varnothing 20$ à 30	$\varnothing 30$ à 40		
Aciers jusqu'à 50 daN/mm ²	30 à 40	0,03 à 0,1	0,12 à 0,23	0,3 à 0,4	0,5 à 0,8	Huile soluble	A
Aciers de 50 à 70 daN/mm ²	20 à 30	0,03 à 0,1	0,12 à 0,2	0,25 à 0,35	0,4 à 0,7	Huile soluble	A
Aciers de 70 à 90 daN/mm ²	15 à 25	0,03 à 0,08	0,1 à 0,18	0,2 à 0,3	0,3 à 0,4	Huile soluble	A
Aciers de plus de 90 daN/mm ²	8 à 15	0,02 à 0,07	0,08 à 0,15	0,18 à 0,25	0,3 à 0,4	Huile soluble	D, E
Aciers inox bonne usinabilité	8 à 12	0,02 à 0,06	0,08 à 0,12	0,14 à 0,22	0,25 à 0,3	Huile soluble	D
Inox mauv. usin. et réfractaires	5 à 8	0,02 à 0,06	0,08 à 0,12	0,14 à 0,22	0,25 à 0,3	Huile soluble	E
Fonte malléable < 160 HB	15 à 25	0,03 à 0,12	0,12 à 0,3	0,35 à 0,5	0,5 à 0,6	A sec	A
Fonte dure > 200 HB	5 à 15	0,03 à 0,08	0,1 à 0,18	0,2 à 0,3	0,35 à 0,5	A sec	D
Laiton sec jusqu'à 58 % Cu	63 à 80	0,06 à 0,25	0,3 à 0,4	0,5 à 0,63	0,7 à 1	Huile soluble - A sec	C
Laiton gras au-dessus de 59 % Cu	30 à 63	0,05 à 0,25	0,15 à 0,3	0,4 à 0,5	0,6 à 0,8	Huile soluble - A sec	C - A
Bronze	25 à 50	0,04 à 0,12	0,15 à 0,25	0,35 à 0,5	0,5 à 0,7	Huile soluble	C
Cuivre rouge	30 à 63	0,04 à 0,12	0,15 à 0,25	0,35 à 0,5	0,5 à 0,7	Huile soluble	B
Cuivre électrolytique	20 à 35	0,04 à 0,12	0,15 à 0,25	0,35 à 0,5	0,5 à 0,7	Huile soluble	A
Alliages légers	40 à 60	0,04 à 0,12	0,15 à 0,25	0,35 à 0,5	0,5 à 0,7	Huile soluble - A sec - Pétrole	B
Matières plastiques tendres	15 à 30	0,02 à 0,07	0,1 à 0,18	0,23 à 0,32	0,4 à 0,6	A sec - Air comprimé	B
Matières plastiques dures	10 à 25	0,03 à 0,08	0,1 à 0,2	0,25 à 0,35	0,4 à 0,6	A sec - Air comprimé	C

FIGURE 11.8 Vitesses de coupe et d'avance préconisées en perçage avec forets en acier rapide.

Doc. Leclerc

Matières à usiner	Vitesses de coupe m/mm	Avances en mm par tour suivant diamètres				Lubrifiants
		jusqu'à Ø 8	Ø 10 à 20	Ø 25 à 40	Ø 50 et plus	
Aciers jusqu'à 70 daN/mm ²	30 à 40	0,03 à 0,04	0,04 à 0,06	0,06 à 0,08	0,08 à 0,15	Huile de coupe - Huile soluble
Aciers de 70 à 100 daN/mm ²	40 à 70	0,03 à 0,04	0,04 à 0,05	0,06 à 0,07	0,07 à 0,1	Huile de coupe - Huile soluble
Aciers de 100 à 130 daN/mm ²	30 à 40	0,02 à 0,03	0,03 à 0,04	0,04 à 0,05	0,06 à 0,08	Huile de coupe - Huile soluble
Aciers de plus de 140 daN/mm ²	15 à 25	0,02 à 0,03	0,03 à 0,04	0,04 à 0,05	0,05 à 0,06	Huile de coupe - Huile soluble
Aciers inoxydables < 100 daN/mm ²	30 à 45	0,02 à 0,03	0,03 à 0,04	0,04 à 0,06	0,06 à 0,08	Huile de coupe - Huile soluble
Aciers inoxydables > 100 daN/mm ²	15 à 25	0,02 à 0,03	0,03 à 0,04	0,04 à 0,05	0,05 à 0,06	Huile de coupe - Huile soluble
Aciers au manganèse 14 %	5 à 15	0,01 à 0,02	0,02 à 0,03	0,03 à 0,04	0,04 à 0,05	A sec
Fonte malléable < 160 HB	30 à 70	0,03 à 0,04	0,05 à 0,06	0,08 à 0,1	0,15 à 0,2	A sec
Fonte dure de 180 à 250 HB	50 à 80	0,03 à 0,04	0,04 à 0,05	0,06 à 0,08	0,08 à 0,12	A sec
Fonte de 300 à 350 HB	10 à 15	0,02 à 0,03	0,03 à 0,04	0,05 à 0,07	0,08 à 0,10	A sec
Cuivre - Laitons - Bronze	60 à 110	0,04 à 0,05	0,06 à 0,08	0,08 à 0,1	0,1 à 0,15	A sec - Huile soluble
Alliages légers	50 à 130	0,04 à 0,06	0,08 à 0,12	0,15 à 0,2	0,25 à 0,3	A sec
Epoxy	40 à 100	0,04 à 0,05	0,06 à 0,08	0,10 à 0,15	0,15 à 0,2	A sec
Bakélite - Plastiques durs - Verre	15 à 30	0,03 à 0,04	0,03 à 0,04	0,05 à 0,06	0,07 à 0,08	A sec - Air comprimé
Porcelaine	5 à 12	0,006 à 0,01	0,01	0,01	0,01	A sec

FIGURE 11.9 Vitesses de coupe et d'avance préconisées en perçage avec forets en carbure monobloc.

Doc. Leclerc

Valeurs indicatives pour l'application des forets SE-Drill

Gr. d'us.*	Matières	Résistance	Exemples	Vitesse de coupe v_c en m/min	Avance par tour f en mm pour ϕ de trou.					
					3	5	8	12	16	20
1	Aciers non-alliés	500 N/mm ²	St37; C15	120	0,06-0,12	0,10-0,18	0,14-0,30	0,20-0,40	0,25-0,50	0,25-0,60
2	Aciers non-alliés	600 N/mm ²	St42; GS45	100	0,07-0,14	0,12-0,20	0,14-0,30	0,20-0,40	0,25-0,50	0,25-0,60
3	Aciers non-alliés	700 N/mm ²	St50; C35; GS52	80	0,07-0,14	0,12-0,25	0,16-0,35	0,25-0,45	0,30-0,60	0,35-0,60
4	Aciers alliés	650 N/mm ²	16MnCr5							
4	Aciers non-alliés	800 N/mm ²	St70; C45; GS60	70	0,07-0,14	0,12-0,25	0,16-0,35	0,25-0,45	0,30-0,60	0,35-0,60
5	Aciers alliés	700 N/mm ²	34CrMo4							
5		800 N/mm ²	42CrMo4; 50CrV4	60	0,06-0,12	0,10-0,18	0,14-0,25	0,16-0,35	0,20-0,45	0,25-0,50
6		900 N/mm ²	32CrMo12; 50CrNi13; C60	50	0,06-0,12	0,10-0,18	0,14-0,25	0,16-0,35	0,20-0,40	0,25-0,45
7	Aciers alliés	1000 N/mm ²	100Cr6; 90MnCrV8	40	0,05-0,10	0,08-0,15	0,12-0,20	0,14-0,25	0,16-0,35	0,20-0,40
8		> 1000 N/mm ²	X210Cr12; 34CrAlNi7	30-40	0,05-0,10	0,08-0,15	0,12-0,20	0,14-0,25	0,16-0,30	0,20-0,35
13		150-200 HB	GG20; GGG40; GTS45	80	0,10-0,20	0,20-0,50	0,30-0,60	0,40-0,70	0,40-0,80	0,40-0,90
14	Fonte	200-220 HB	GG30; GGG50; GTS55	60	0,10-0,20	0,20-0,45	0,30-0,50	0,40-0,60	0,40-0,70	0,40-0,80
15	GG, GGG, GTS	220-250 HB	GG40; GGG60; GTS65	50	0,08-0,18	0,16-0,40	0,25-0,45	0,30-0,50	0,30-0,60	0,30-0,70
16		250-320 HB	GGG70; GTS70	40	0,07-0,18	0,14-0,30	0,20-0,40	0,25-0,40	0,30-0,50	0,30-0,60

FIGURE 11.10 Vitesses de coupe et d'avance préconisées en perçage avec forets en carbure (monobloc, embout, plaquettes)

2.6 Vitesse de coupe

Elles sont définies en fonction des matériaux à usiner et des outils, pour des profondeurs de perçage : 2 D avec forets carbure; déburrage tous les 2 D avec forets en acier rapide.

Profondeur maximale de perçage

Avec foret en carbure : de 3 à 4 D, sous une bonne évacuation des copeaux; de 6 D sous lubrification forcée (par l'outil).

Facteur de correction de la vitesse de coupe

1,2 D pour les perçages de profondeur inférieure à 2 D; 0,8 D pour des profondeurs supérieures à 2 D.

Plage des vitesses de coupe

Elles varient selon les matériaux, de :

5 à 80 m/min pour forets en acier rapide (fig. 11.8).

5 à 150 m/min pour forets à embout carbure brasé et carbures monoblocs (fig. 11.9).

30 à 400 m/min pour forets à plaquettes ou embout carbure indexés (fig. 11.10).

Arrosage : Nécessaire à grand débit pour assurer la coupe sans détérioration rapide de l'outil.

2.7 Puissance nécessaire à la coupe P_w

À déterminer en considérant l'effort tangentiel de coupe F_c (fig. 11.11).

Puissance utile de perçage

$$P_u = f \cdot D \cdot K_a \cdot V / 180 \cdot \eta,$$

avec :

f = avance par tour en mm

D = diamètre du foret en mm

K_a = pression spécifique de coupe, en N/mm^2

V = vitesse de coupe en m/min

η = rendement de la machine.

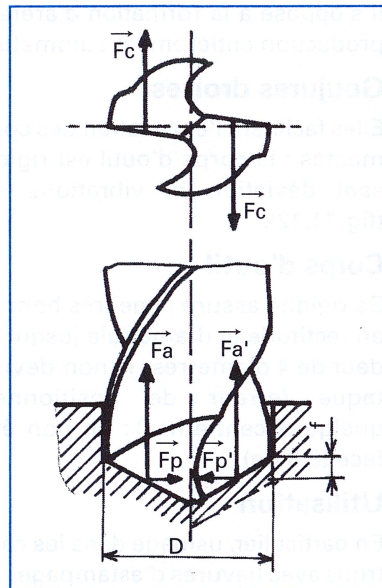


FIGURE 11.11

Efforts de coupe en perçage (pleine matière).

11

2.8 Mise en œuvre des perçages

Forets hélicoïdaux monoblocs en acier rapide

Usinage de la plupart des matériaux, à tous diamètres avec vitesse de coupe adaptée.

Matériaux difficilement usinables. Utiliser des forets en acier rapide additionné de cobalt ($\cong 5\%$).

Amélioration de l'état de surface des trous. Utiliser des forets en acier rapide revêtu TIN (1 à 4 μm de nitrure de titane sur les parties actives) : diminution de l'effort de coupe et de l'usure d'outil ; bonne résistance à l'abrasion et à la corrosion.

Forets hélicoïdaux monoblocs en carbure

Revêtus ou non revêtus, ils ont une grande durée de vie, avec : des vitesses de coupe élevées (jusqu'à 120 m/min dans les aciers alliés) ; de fortes avances (jusqu'à 0,6 mm/tr pour les plus gros diamètres).

Ils produisent une faible surcote de perçage (0,02 à 0,05 mm) avec : une bonne précision de positionnement ; un très bon état de surface.

Leurs diamètres les plus courants sont de 3 à 20 mm.

Forets à plaquettes carbure indexées ou brasées

Avec des plaquettes spécifiques en forme et matériau, revêtues (carbonitrure de titane ou Al_2O_3) ou non revêtues, à goujures droites ou hélicoïdales : perçage de tous matériaux (dont exotiques, aciers fortement alliés, alliages d'aluminium, plastiques) dans les diamètres de 17 à 30 mm en général.

Vitesses de coupe très élevées (jusqu'à 400 m/min) sous arrosage par le corps d'outil, jusqu'à des profondeurs de 10 diamètres.

Revêtement des plaquettes

Il s'oppose à la formation d'arête rapportée et assure une longue durée de vie favorable en production entièrement automatisée.

Goujures droites

Elles facilitent l'évacuation des copeaux fragmentés : le corps d'outil est rigidifié, réduisant déviation et vibrations éventuelles (fig. 11.12).

Corps d'outil

Sa rigidité assure : une très bonne précision en rectitude et diamétrale jusqu'à la profondeur de 4 diamètres ; la non-déviation à l'attaque (erreur de positionnement de quelques centièmes) ; un bon état de surface (0,8 Ra).

Utilisation

En particulier, usinage dans les cas difficiles : trous avec bavures d'estampage ; attaque sur face forgée, coulée ou laminée, courbe ou inclinée ; coupe interrompue.

Selon leur diamètre, de 16 à 60 mm, le nombre de plaquettes varie de 1 à 7 (avec lubrification par le corps d'outil).

Les forets à plaquettes ou embouts carbure rapportés, avec lubrification par le corps d'outil, ont des diamètres généralement de 10 à 22 mm (fig. 11.13).

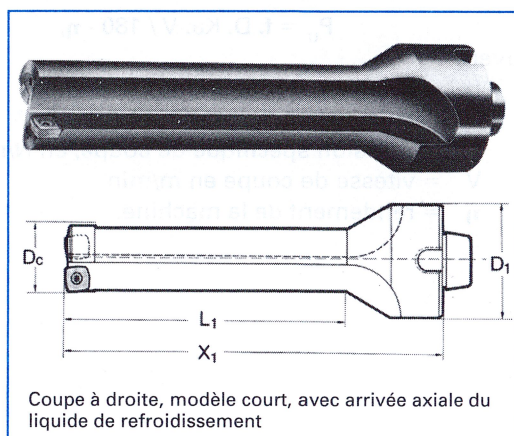


FIGURE 11.12 Foret plaquettes carbure à goujures droites (type stardrill B.3020).
Doc. Novex

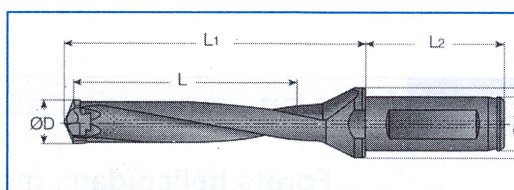
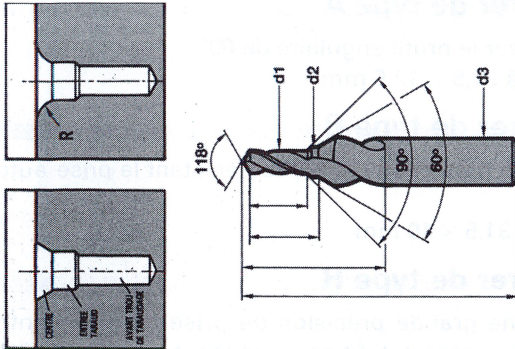


FIGURE 11.13 Foret à embout carbure rapporté interchangeable.
Doc. Iscar

2.9 Centrage des trous en bout d'arbre

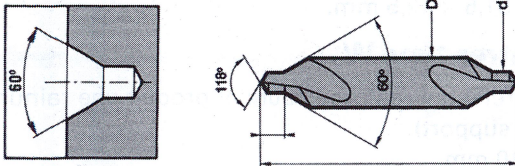
(Centres de prise de pièces cylindriques) Utiliser les forets à centrer (NF E 66.051, A, B, R ou W et DIN 333, A, B, R ou W) en série normale, longue et extra-longue, avec arêtes coupantes au profil angulaire de 60° (fig. 11.14).

Pour trous de taraudage en bout d'arbre



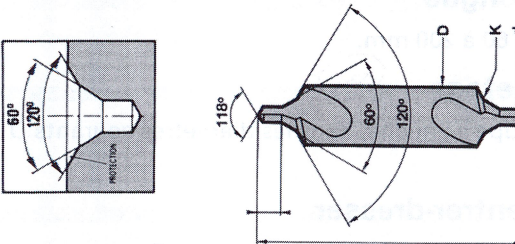
d_3	d_2	d_1	L	P	$R_{\max}$
$h7$	$+0,1$ $+0$	$h8$	± 1	-0 $-0,1$	$1,25R$

Type A



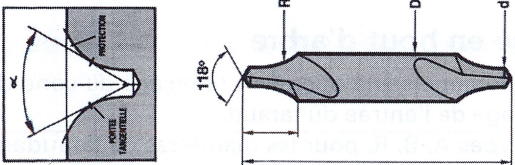
D	d	L	Angles 60° 118°
$h8$	$k12$	± 1	-0 $-30'$ ± 12

Type B



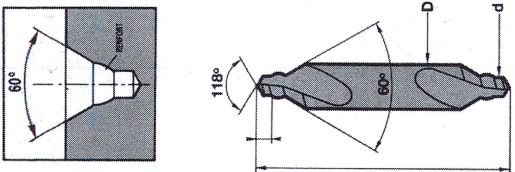
D	d	L	K	Angles 60° 120° 118°
$h8$	$k12$	± 1	$k12$	-0 $-30'$ -0 -4° ± 2

Type R



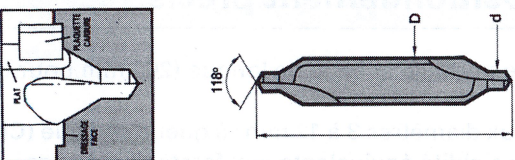
D	d	L	$R_{\max}$	Angles 118°
$h8$	$k12$	± 1	$1,25R$	± 2

Type W



D	d	L	Angles 60° 118°
$h8$	$k12$	± 1	-0 -30 ± 2

Pour machines à centrer



D	d	L	Angles 60° 118°	P
$h8$	$k12$	± 1	-0 -30 ± 2	-0 $-0,1$

FIGURE 11.14 Différents forets à centrer.

Doc. Magafor

Forets à centrer de type A

(NF 66.051) Ils permettent uniquement de réaliser le profil angulaire de 60°.

Les diamètres courants $D \times d$ sont de : $2 \times 0,5$ à $31,5 \times 12,5$ mm.

Forets à centrer de type B

Réalisation du profil de 60° et d'un chanfrein de protection de 120° et facilitant la prise automatique des pièces entre pointes.

Les diamètres courants $D \times d$ sont de $3 \times 0,5$ à $31,5 \times 10$ mm.

Forets à centrer de type R

Réalisation d'un profil curviligne, assurant une grande précision de prise de pièce entre pointes; portée tangentielle précise de la pointe support, tout en protégeant le centre contre les chocs).

Les diamètres courants $D \times d$ sont de $3 \times 0,5$ à $31,5 \times 12,5$ mm.

Forets à centrer type W

(NF E 66.051 - W et DIN 333 - W). Avec un bourrelet qui renforce l'outil et produit une rainure circulaire (améliore la lubrification de la pointe support).

Les diamètres courants sont de $3 \times 0,5$ à 25×10 mm.

Série longue

La longueur totale des forets à centrer varie de 60 à 200 mm.

Décolletage

Les forets à centrer, de type A, B et R, sont à coupe à gauche, dans les diamètres courants $D \times d$ de $3,15 \times 0,5$ à 20×8 mm.

Machines à centrer-dresser

Les forets de type A, B, R, peuvent être conçus avec un plat sur le diamètre D pour recevoir une plaquette (carbure) de dressage simultané.

Trous de taraudage en bout d'arbre

En travaux de série, utiliser des forets réalisant en une seule opération : perçage du cône de prise de pièce, du trou de taraudage et chambrage de l'entrée du taraud.

Les forets à centrer-percer-chambrer sont des types A, B, R, pour les diamètres de taraudage de M4 à M24.

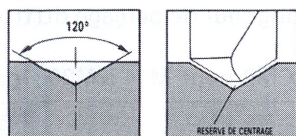
Pour machines à centrer-dresser, ils peuvent avoir : un plat de logement d'une plaquette (carbure) de dressage ; des rainures de lubrification.

2.10 Pointage des trous à positionnement précis

Sur MOCN, utiliser les forets à pointer, en série normale et en série longue (200 mm pour les grands diamètres) (fig. 11.15).

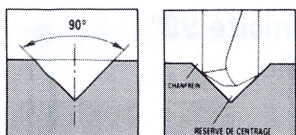
Ils sont conçus à coupe à droite ou à gauche : aux diamètres 3 à 12 mm ; à queue conique (CM) pour les grands diamètres (de 16 à 25 mm) ; de rigidité équivalente aux forets de perçage.

Utilisation systématique pour positionner les perçages avec MOCN.



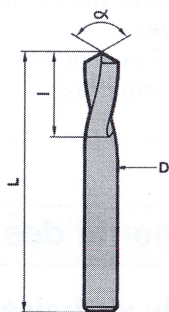
Angle 120°:

L'avant-trou obtenu par le foret **NC magafor** correspond à l'angle en bout de l'outil de perçage et évite à celui-ci de dévier.



Angle 90°:

En utilisant le foret **NC magafor** de diamètre supérieur à l'outil de perçage, on obtiendra centrage et chanfreinage en une seule opération.



D	Angle	L	l
h 6	$\pm 1^\circ$	± 1	$\begin{matrix} +1 \\ +0 \end{matrix}$

Forets à pointer d'angle de pointe à 120°

Identique à celui des forets de perçage ; toute possibilité de déviation à l'attaque est supprimée.

Les diamètres courants sont de 3 à 25,4 mm.

Forets à pointer d'angle de pointe à 90°

(NF E 66.052) À utiliser d'un diamètre supérieur à celui du foret de perçage, assurant pointage et chanfreinage du trou dans une seule opération.

Les diamètres courants sont de 2 à 25,4 mm.

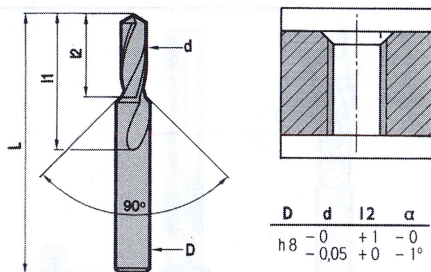
FIGURE 11.15

Forets à pointer.

Doc Magafor

2.11 Perçage des trous de taraudage

En travaux de série, utiliser des forets étagés réalisant en une seule opération perçage et chanfreinage du trou (fig. 11.16).



D	d	l2	α
h 8	$\begin{matrix} -0 \\ -0,05 \end{matrix}$	$\begin{matrix} +1 \\ +0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -0 \\ -1^\circ \end{matrix}$

Conception : rigide, à queue cylindrique (diamètre de queue supérieur au diamètre nominal) ; pour les diamètres de taraudage M3 à M12 avec longueurs de perçage de 8 à 30 mm selon diamètre.

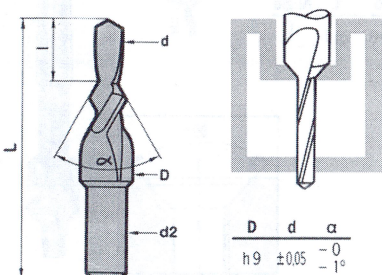
FIGURE 11.16

Foret étagé de perçage-chanfreinage avant taraudage.

Doc Magafor

Perçage des trous de taraudage avec tête de vis à 90° et avant-trous

En travaux de série, utiliser des forets étagés (fig. 11.17). Ces forets sont conçus :



D	d	α
h 9	$\pm 0,05$	$\begin{matrix} -0 \\ -1^\circ \end{matrix}$

FIGURE 11.17

Foret étagé de perçage avant-trou et tête de vis.

Doc Magafor

À **queue cylindrique** pour diamètres de taraudage M3 à M12 avec longueur de perçage du trou de taraudage de 9 à 30 mm selon les diamètres.

À **queue conique** : CM1, pour diamètres de taraudage M8 à M12; CM2 pour M14 à M20; longueur de perçage de 20 à 48 mm, selon les diamètres.

2.12 Chambrage des logements des têtes de vis

Logements des têtes de vis fraisées, conicité 90°

Utiliser des forets étagés, des fraises à chambrer, des fraises à noyer.

Forets étagés

Réalisation, en une seule opération, du passage de vis et du logement de la tête de vis.

De conception en ARS, à goujures hélicoïdales, pour vis des diamètres M2 à M12, longueurs de perçage du passage de vis 6 à 28 mm, selon les diamètres (fig.11.18).

Pour des perçages profonds dans les matériaux tendres (agglomérés...) et d'accès difficile dans les profilés, on utilisera des forets étagés de série longue.



Forets étagé avant-trou taraudage

Angle de passage des 2 diamètres α 90°

Queue cylindrique

Denture hélicoïdale à droite 30°

Double goujure

Coupe à droite

acier Super Rapide

FIGURE 11.18 Foret étagé pour avant-trou de taraudage et passage de vis.

Doc. Leclerc

Fraises à chambrer

Monoblocs, partie active et pilote, avec queue d'entraînement.

Le pilote assure le centrage de l'outil dans le trou préalablement percé (au diamètre de passage de vis ou de trou d'avant taraudage); il est à ajustement fin ou moyen, selon la précision de coaxialité désirée (fig.11.19).

Elles sont de conception : à queue cylindrique pour vis de diamètre M1 à M12; à queue conique (CM2 à CM3, selon les diamètres) pour vis M12 à M16.

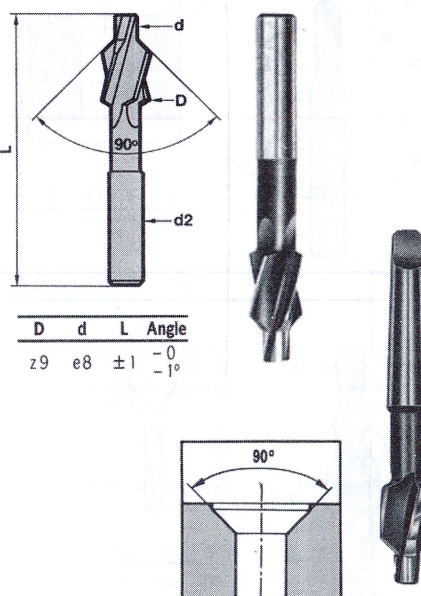


FIGURE 11.19

Fraise à chambrer monobloc.

Doc. Magafor

Fraises à noyer

Monoblocs, avec trois dents assurant : auto-centrage dans le trou préalablement percé ; coupe sans vibrations (fig.11.20).

Leurs dimensions courantes, au grand diamètre du cône, sont de 4 à 50 mm avec : queue cylindrique jusqu'au diamètre 10, queue conique ou cylindrique au-delà de 10 mm.

Elles permettent également le chanfreinage (voir chapitre « Procédés de fraise »).

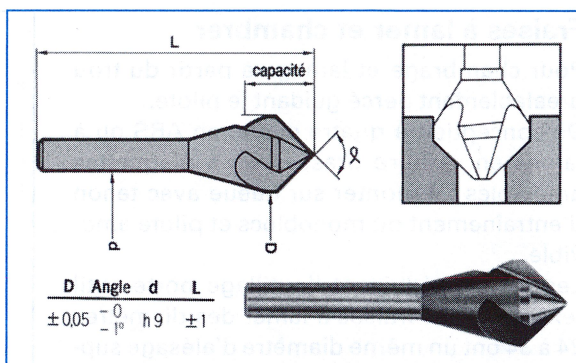


FIGURE 11.20 Fraise à noyer monobloc, 3 dents. Doc. Magafor

Logements des têtes de vis à fond plat (cylindriques, hexagonales...)

Utiliser des forets étagés, des fraises à chambrer, des fraises à lamer et chambrer.

Forets étagés

Réalisation, en une seule opération du passage de vis et du logement de la tête de vis (fig.11.21).

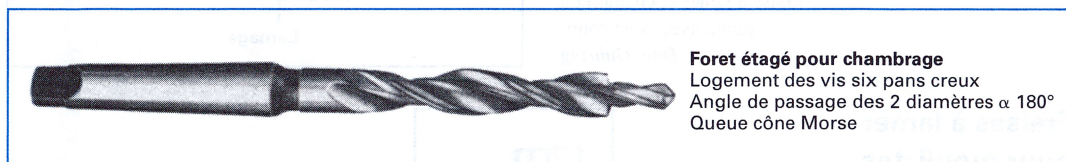


FIGURE 11.21 Foret étagé pour tête de vis à fond plat.

Doc. Leclerc

De conception en ARS, à goujures hélicoïdales, ils sont : à queue cylindrique pour les vis des diamètres M3 à M10, à queue conique pour les vis M5 à M20.

Longueur de perçage de 13 à 43 mm selon les diamètres.

Fraises à chambrer

Pour chambrage avec guidage de l'outil par le pilote se centrant dans le trou de passage de vis préalablement percé.

Le pilote est à ajustement fin ou moyen, selon la précision de coaxialité désirée (fig. 11.22).

Elles sont de conception monobloc : à queue cylindrique pour vis de diamètres M1 à M12 ; à queue conique (CM2 à CM4, selon les diamètres) pour les vis de M12 à M24.

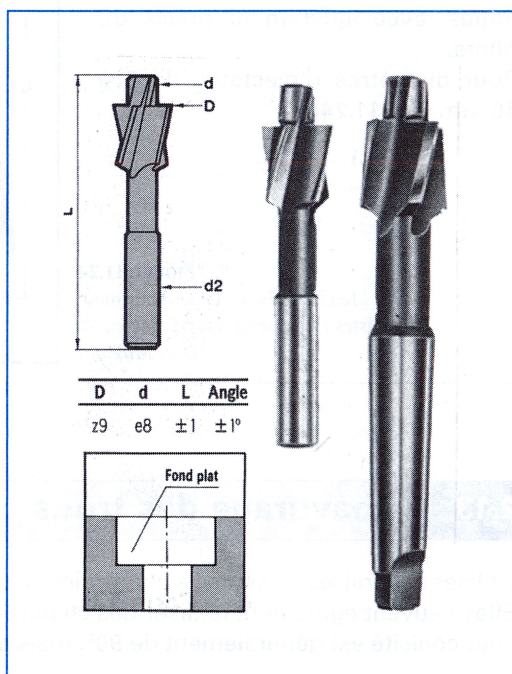


FIGURE 11.22

Fraise à chambrer monobloc.
Doc. Magafor

Fraises à lamer et chambrer

Pour chambrage et lamage à partir du trou préalablement percé guidant le pilote.

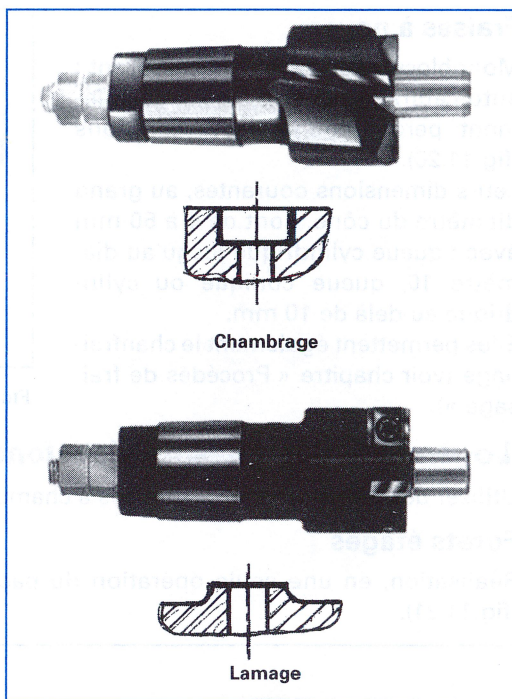
De conception à quatre dents, en ARS ou à lames en carbure brasées ou à plaquettes amovibles : à monter sur queue avec tenon d'entraînement ou monoblocs et pilote amovible.

Les pilotes réduisent l'outillage porte-outil (exemple : les fraises à lamer des diamètres 24 à 34 ont un même diamètre d'alésage support pilote de 9,5 H7 (fig. 11.23).

FIGURE 11.23

Fraise à lamer et chambrer à pilote avec cône court.

Doc. Guhring



Fraises à lamer pour moulistes

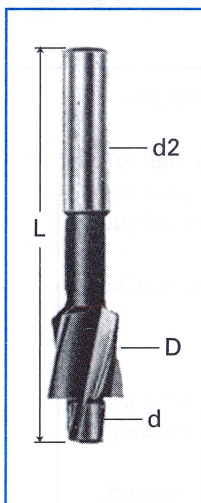
À utiliser pour logements des têtes d'éjecteurs dans les moules métalliques, avec ajustement précis du pilote.

Pour diamètres d'éjecteurs de 2 à 10 mm (fig. 11.24).

FIGURE 11.24

Jeu de fraises à lamer pour moulistes (logements têtes d'éjecteurs).

Doc. Magafor



HSS 8% COBALT M42

Ø éjecteur ejector	D x d	L	d2
2	4,2 x 2,0	60	D
2,5	5,2 x 2,5	60	D
3	6,2 x 3,0	60	D
4	8,2 x 4,0	60	D
5	10,2 x 5,0	90	10,0
6	12,2 x 6,0	90	10,0
8	14,2 x 8,0	90	12,5
10	16,2 x 10,0	90	12,5

2.13 Ébavurage des trous

Utiliser des fraises coniques à chanfreiner à trou ou à dents.

Elles peuvent également réaliser des chanfreins.

Leur conicité est généralement de 90°, mais aussi de 60°, 82°, 100°, 120°.

Fraises à ébavurer à trou

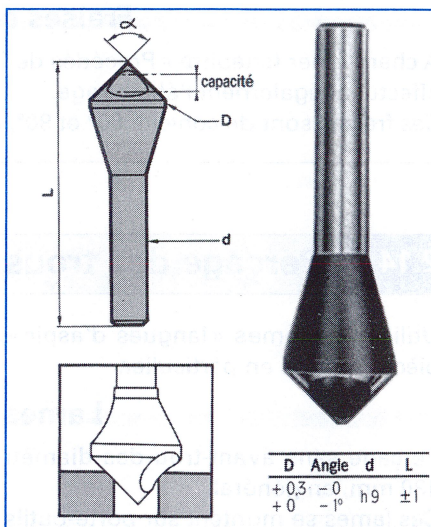
Recommandées pour l'usinage de matériaux tendres (alliages d'aluminium, plastiques...) Leurs diamètres à la base du cône sont de 10 à 80 mm (fig.11.25).

Pour chaque fraise : diamètre minimum du trou à ébavurer $\cong 1/2$ diamètre de la base du cône, diamètre maximum = diamètre de la base du cône moins 1 à 2 mm, selon les fraises.

FIGURE 11.25

Fraise à ébavurer à trou.

Doc. Magafor



Fraises à chanfreiner à une dent

Elles peuvent être utilisées en ébavurage, en particulier dans les matériaux tendres (fig.11.26).

Diamètre minimum du trou à ébavurer = 1 à 3 mm selon les fraises, soit au voisinage du sommet du cône.

Matériaux tendres (bois et agglomérés, plastiques) et de faible épaisseur, effectuer le perçage du passage de vis et le chanfreinage dans une seule opération.

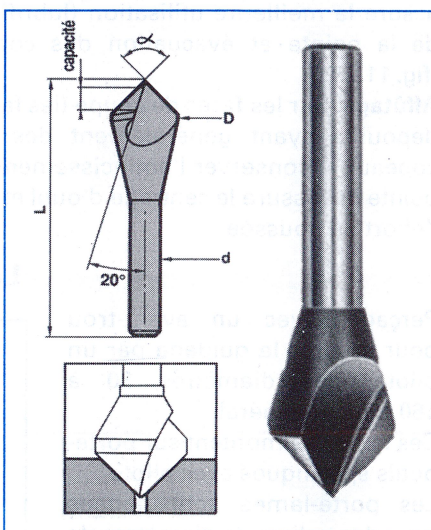
Capacité maximale de ces fraises = diamètre de la base du cône.

La conicité peut être de 30°, 45°, 60°, 82°, 90°, 100°, 120° pour des diamètres à la base du cône de 6 à 80 mm.

FIGURE 11.26

Fraise à chanfreiner une dent.

Doc. Magafor



Fraises à lamer conique

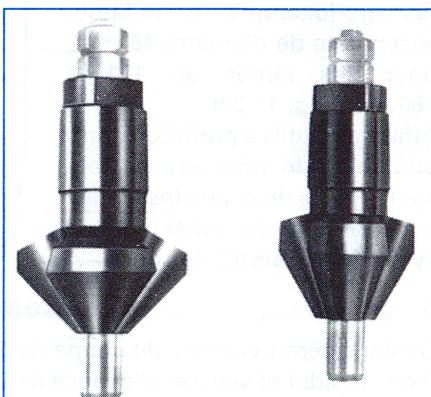
À 3 ou 4 dents, de conicité 60° et 90°; diamètres à la base du cône = 8 à 46 mm.

À monter sur support avec un pilote au diamètre du trou préalablement percé (fig. 11.27).

FIGURE 11.27

Fraise à lamer conique 3 dents, 60° et 90° ; avec pilote.

Doc. Guhring



Fraises coniques « une taille »

À chanfreiner (chapitre « Procédés de fraisage ») monoblocs à queue cylindrique ou conique : effectuent également l'ébavurage.

Ces fraises sont de conicité 60° et 90°, avec des diamètres à la base du cône de 10 à 40 mm.

2.14 Perçage des trous à diamètre relativement grand

Utiliser les lames « langues d'aspic », les lames spirales, les forets de carottage, dans les pièces minces en particulier.

Lames « langues d'aspic »

Perçage sans avant-trou des diamètres 5 à 130 mm, en général.

Ces lames se montent sur porte-outils spécifiques à queue conique.

Lubrification. Par le centre du porte-outil ; assure la meilleure utilisation (lubrification de la pointe et évacuation des copeaux) (fig. 11.28).

Affûtage. Sur les faces de coupe (les faces de dépouille ayant généralement des brise-copeaux) : conserver l'amincissement de la pointe qui assure le centrage d'outil et réduit l'effort de poussée.

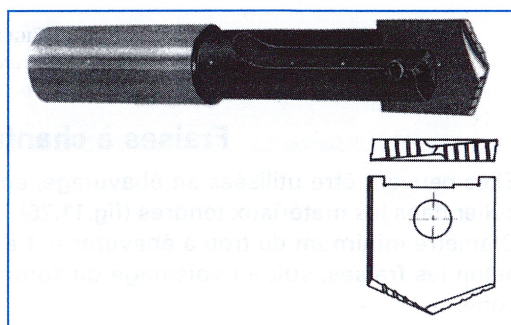


FIGURE 11.28 Lame « langue d'aspic » et porte-lame.

Doc. Leclerc

Lames spirales

Perçage, avec un avant-trou pour assurer le guidage par un pilote, des diamètres 30 à 160 mm en général.

Ces lames se montent sur porte-outils spécifiques avec pilote.

Les porte-lames sont conçus pour des paliers de diamètres de perçage (exemple : porte-lame, avec pilote de diamètre 46 mm, pour des lames de 101 à 160 mm) (fig. 11.29).

Affûtage. Outils à profil constant, affûtés de nombreuses fois sur les faces de coupe (essentiellement) tout en conservant la symétrie des arêtes de coupe.

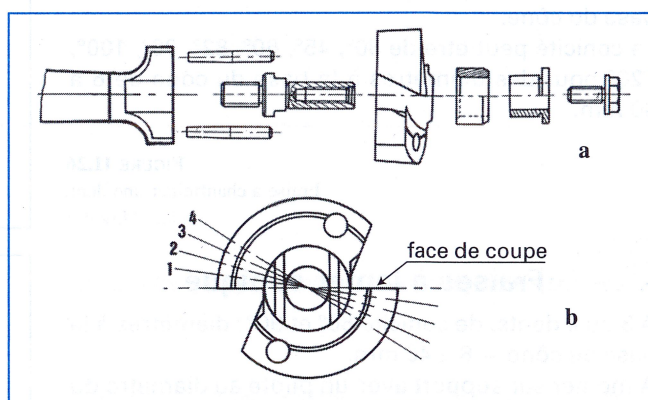


FIGURE 11.29 Lame spirale

a - avec éléments du porte-outil

b - affûtages successifs de la lame

Doc. Leclerc

Conditions de coupe

On considère : vitesses de coupe de 20 % inférieures à celles des forets de même matériau (acier rapide) et vitesses d'avance de 20 % supérieures.

Vitesses de coupe : 8 à 30 mètres/minute selon les matériaux.

Vitesses d'avance : 0,15 à 0,50 mm/tour selon les diamètres et les matériaux usinés (fig. 11.30).

Matériau	V m/min		Diamètre des lames							
			25	33	40	50	62	80	100	125
Acier non allié jusqu'à 70 daN/mm ²	20	f	0,20	0,20	0,25	0,32	0,32	0,40	0,50	0,50
		n	255	200	160	125	100	80	65	50
		kw	1,25	1,70	2,10	3,30	4,10	6,80	8,80	10,60
Acier allié jusqu'à 80 daN/mm ²	15	f	0,20	0,20	0,25	0,25	0,30	0,30	0,40	0,40
		n	190	190	120	95	80	60	50	40
		kw	1,50	2,70	2,00	2,50	3,90	4,80	8,40	10,50
Acier allié au-dessus	10	f	0,15	0,15	0,20	0,25	0,25	0,25	0,30	0,40
		n	150	130	100	80	65	50	40	32
		kw	0,90	1,40	2,00	2,10	2,60	3,40	5,00	8,40
Acier doux	30	f	0,20	0,20	0,25	0,32	0,32	0,40	0,50	0,50
		n	400	315	250	200	160	125	100	80
		kw	2,30	3,20	4,10	6,56	8,10	13,10	19,00	23,75
Fonte jusqu'à 200 Brinell	20	f	0,25	0,32	0,40	0,50	0,50	0,50	0,60	0,60
		n	280	260	180	140	120	90	70	60
		kw	0,90	1,80	2,30	3,15	4,20	5,20	7,60	10,10
Fonte au-dessus de 200 Brinell	8 à 10	f	0,20	0,20	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,50
		n	125	100	80	60	50	40	30	25
		kw	0,40	0,60	0,70	1,20	1,40	2,50	3,20	4,10
Cuivre et bronze	20	f	0,20	0,20	0,30	0,40	0,40	0,50	0,50	0,60
		n	230	210	160	130	105	80	60	50
		kw	0,75	1,20	1,70	2,90	3,50	5,10	6,00	9,40
Laiton Ms 58-50	30	f	0,20	0,20	0,25	0,30	0,30	0,40	0,50	0,50
		n	380	320	240	190	160	125	100	80
		kw	0,60	0,90	1,00	1,40	1,90	3,20	4,50	5,60

FIGURE 11.30 Conditions de coupe recommandées pour lames.

Doc. Leclerc

Forets de carottage

Réalisation en une seule opération, des trous de grand diamètre (de 120 à 220 mm, généralement) tout en produisant une chute cylindrique, la carotte.

Ces forets, ou têtes de carottage, sont constitués d'une couronne supportant les outils de coupe. Ils se montent sur des porte-outils spécifiques (tubulaires).

Ils permettent de récupérer de la matière en perçage de grands diamètres dans des pièces de toutes épaisseurs.

11

2.15 Perçage des trous longs

Éviter la déviation d'outil durant sa trajectoire, avec :

Un angle de direction d'arête κ_r (kappa r) maximum (voisin de 90°) annulant les poussées latérales.

Des patins d'auto-guidage sur la tête de perçage, agissant après guidage à l'attaque par une bague.

Les forets 3/4 avec tête de perçage (carbure...) produisent des trous longs – le forage – avec précisions courantes de : IT 7 à 9 ; Ra 0,4 à 1,6 ; circularité < 4 μm (forets Outiltec) (fig. 11.31). La lubrification sous-pression par le corps d'outil est nécessaire pour la réfrigération et l'évacuation des copeaux.

Machines à commande numérique, pour programmer le perçage avec débouillage : évacua-

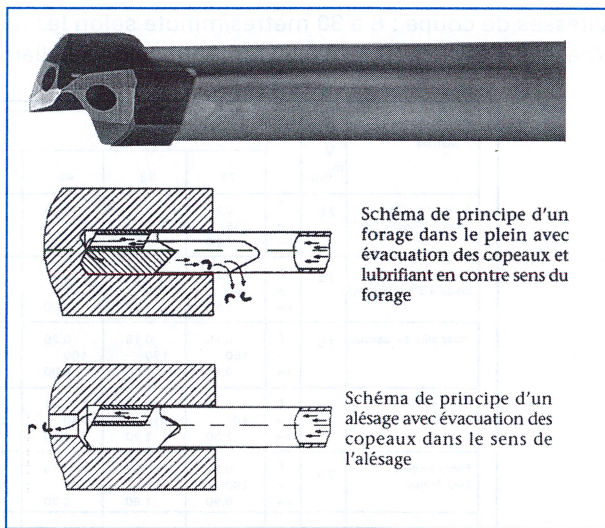
tion des copeaux ou arrêts temporisés pour briser les copeaux (facilitant leur évacuation) ou machine spécifique de forage profond.

FIGURE 11.31

Foret de perçage profond.

- a - foret 2 lèbres
- b - perçage pleine matière avec foret 3/4
- c - perçage trou ébauché avec foret 3/4

Doc. Outiltec



2.16 Cycles des perçages

Les commandes numériques des machines-outils par coupe, de tous types (perçage, fraisage, tournage...) comportent des cycles de perçage automatique pour un trou et un ensemble de trous définis dans le programme d'usinage (fig. 11.32).

Cycles de perçage et pointage

Provoque le perçage automatique à la profondeur programmée.

Cycle de perçage - lamage - chambrage

Provoque le perçage avec un arrêt temporisé à la profondeur programmée pour en assurer la précision de longueur de perçage.

Cycle de perçage profond avec débouillage

Provoque des séquences successives de perçage de longueurs variant entre la première séquence ($P = 2$ à 3 diamètres du foret) et la dernière séquence ($Q = 1$ à 0,5 diamètre); la CN détermine les profondeurs intermédiaires.

À chaque séquence, l'outil est dégagé du trou pour évacuer les copeaux (débouillage).

Utilisation : perçage profond avec foret non lubrifié par le corps; perçage profond de matériaux à copeaux courts.

Cycle de perçage profond avec brise-copeaux

Provoque des séquences successives de perçage à la fin desquelles un arrêt temporisé de l'avance produit la rupture des copeaux.

Utilisation : perçage profond de matériaux à copeaux longs, avec forets lubrifiés par le corps.

Cycles de positionnement automatique du foret

Intégrés dans la CN de perceuses en particulier (fig. 11.33).

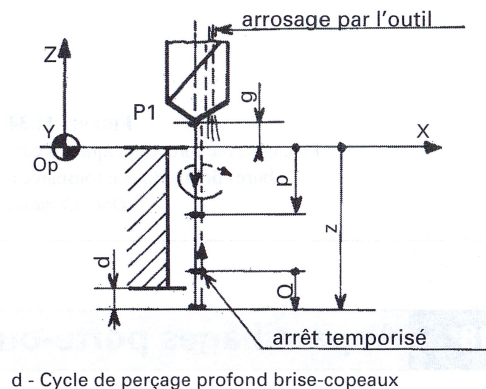
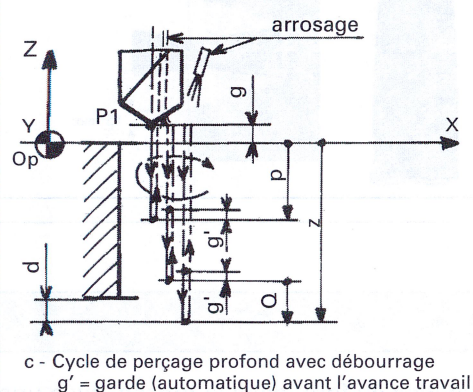
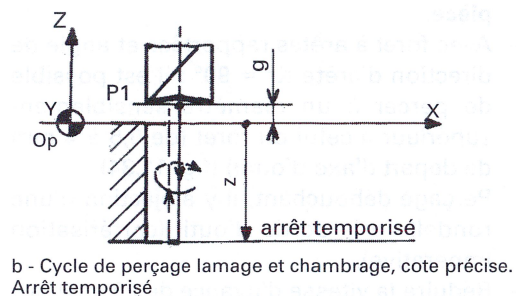
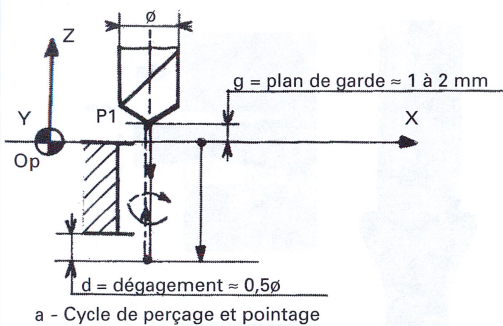
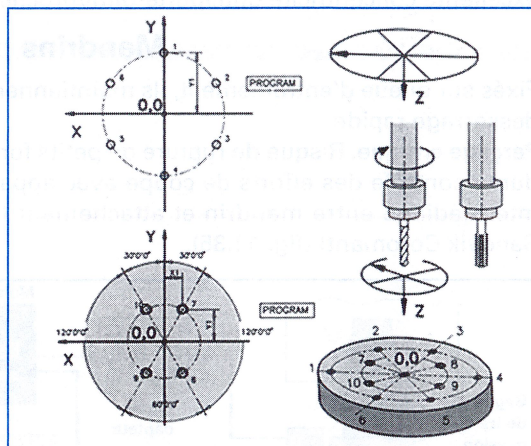


FIGURE 11.32 Cycles fixes de perçage sur MOCN.

FIGURE 11.33
Schéma de cycle de positionnement
automatique en perçage.
Doc. Sermac

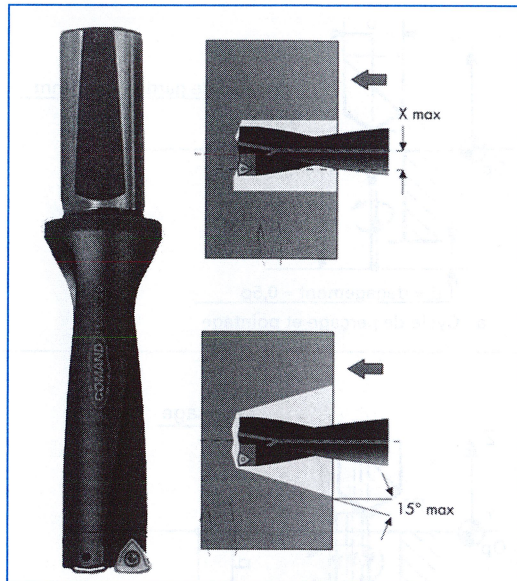


2.17 Mouvements de génération

- **Mouvement de coupe donné :**
 - À l'outil sur perceuses, fraiseuses, centres d'usinage, centres de tournage.
 - À la pièce sur tours, centres de tournage (avec trou concentrique à l'axe de rotation de la pièce).

- **Perçage, mouvement de coupe donné à la pièce.**
- Avec foret à arêtes rapportées et angle de direction d'arête $K_r = 90^\circ$: il est possible de percer à un diamètre sensiblement supérieur à celui du foret (de 0,5 à 4 mm de départ d'axe d'outil) (fig. 11.34).
- Perçage débouchant, il y a éjection d'une rondelle à la sortie d'outil (cartérisation impérative).
- Réduire la vitesse d'avance de 20 à 50 %.

FIGURE 11.34
Perçage avec foret (à plaquettes carbure) désaxé (pièce tournante).
Doc. Comand



2.18 Appareillages porte-outils

Ils doivent assurer mise en position et démontage rapides du foret dans la broche, avec une excellente concentricité outil/porte-outil/broche.

Mandrins porte-foret

Fixés sur queue d'entraînement, ils maintiennent les forets à queue cylindrique, avec serrage-desserrage rapide.

Perçage critique. Risque de rupture de petits forets en perçage en pleine matière de matériaux durs : contrôle des efforts de coupe avec appareil (à jauges de contraintes) intermédiaire entre mandrin et attachement (système « Intelli-Tool » de Sandvik Coromant) (fig. 11.35).

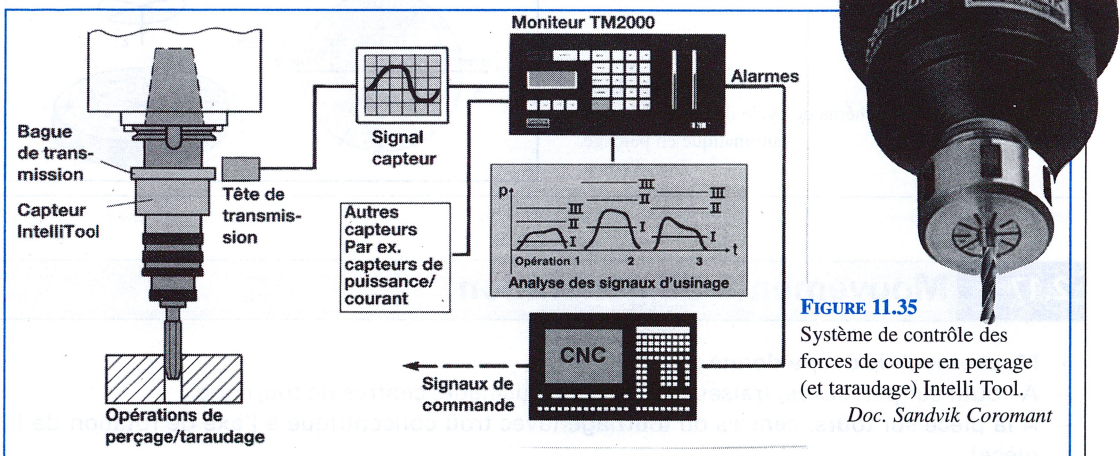


FIGURE 11.35
Système de contrôle des forces de coupe en perçage (et taraudage) Intelli Tool.
Doc. Sandvik Coromant

Mandrins à pinces

De petits diamètres à queue cylindrique : assurent une excellente concentricité outil/porte-outil et un serrage efficace.

Ils acceptent des fréquences de rotation élevées (20 000 tr/min) sans vibrations.

Têtes de perçage

Conçues pour optimiser (temps de production ; nombre de phases) sur MOCN.

Tête à broches multiples

Production de grande série (usinage transfert) : perçage simultané de diamètres et profondeurs différents ou non.

Têtes angulaires

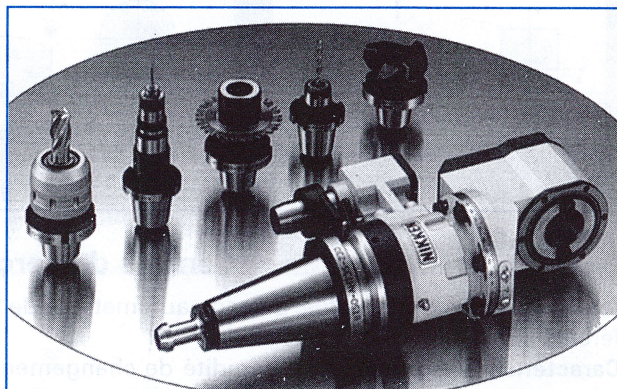
Usinage, sur machines à CN, dans des directions non cartésiennes sans avoir à changer la pièce de position (nombre de phases réduit) ; perçages de position géométrique précise (fig. 11.36).

Les outils, avec leur porte-outils respectifs, sont à changement rapide.

FIGURE 11.36

Tête à renvoi d'angle (à changement rapide)

Doc. Nikken



1.19 Machines de perçage

Elles doivent assurer un positionnement rapide et le plus précis possible des outils (perçages successifs sur une ou plusieurs pièces installées sur table-machine).

Perceuses à CN

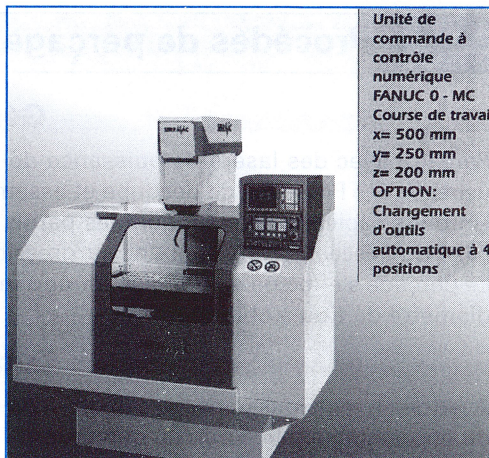
À broche verticale 3 axes (x y z) pour tous les travaux en point à point (perçage, taraudage...) (fig. 11.37).

Du fraisage léger en paraxial est généralement réalisable sur ces machines pour pièces à percer comportant peu de fraisage dans la phase.

FIGURE 11.37

Perceuse à commande numérique.

Doc. Sermac



Des cycles de recherche d'origine automatique (centre de surfaces prismatiques et cylindriques), équipent des perceuses à CN (fig. 11.38).

Différentes figures géométriques situant un réseau de trous identiques sont programmables. (perçages successifs automatiquement).

Menus de perçage, programmation interactive par apprentissage optimisent la mise en œuvre.

Capacité. Le diamètre de perçage maximum, dans l'acier, est généralement de 40 mm et le taraudage de M 26, pour les perceuses à CN.

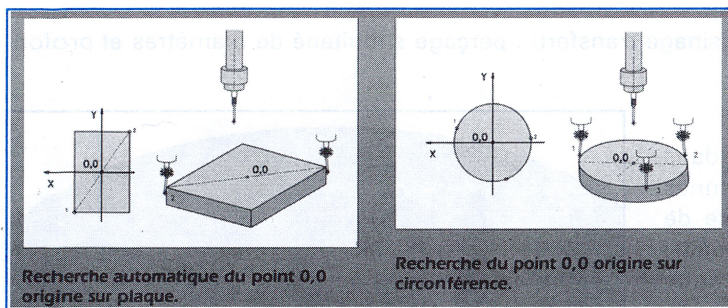


FIGURE 11.38

Cycles de recherche automatique d'origine pièce sur perceuse CN.

Doc. Sermac

Centres de perçage

Avec la tourelle porte-outils, perçage automatique de l'ensemble des trous de diamètres différents sur la plupart des pièces.

Caractéristiques principales. Rapidité de changement d'outils (quelques sec.); vitesse des déplacements; précision de positionnement en x y (0,02 à 0,01 mm); répétabilité à 0,005 mm; programmation conversationnelle et banque de données.

3. Procédés de perçage par érosion

3.1 Procédés de perçage au laser

Généralités

Perçage avec des lasers de puissance délivrant des impulsions qui vaporisent le matériau usiné (voir « Procédés de découpe et assemblage »).

Un puits capillaire se crée, dont les parois entrent en fusion; la vaporisation s'effectue dans l'axe du faisceau produisant une surpression qui éjecte la matière fondue.

Le perçage s'effectue en plongée (tamponnage) ou en découpe orbitale (trépannage), selon le diamètre du trou à obtenir.

Tamponnage

Avec des impulsions dans l'axe du trou, on perce de petits diamètres limités par la focalisation du faisceau (quelques mm au minimum).

Trépannage

Avec des impulsions et un mouvement orbital de l'optique de focalisation, on effectue une découpe circulaire.

Conditions d'utilisation

Profondeur de perçage

Elle est limitée par le rapport profondeur/diamètre du trou et la possibilité d'évacuation de particules en fonction des matériaux usinés.

Vitesse de perçage

Elle est très rapide, particulièrement en perçage tamponnage. C'est le temps de déplacement d'un trou à l'autre qui conditionne la productivité, avec le chargement-déchargement de la pièce.

Utilisation

Perçage de très petit diamètre et de faible profondeur dans des matériaux difficilement usinables par des procédés conventionnels, tel que le perçage du diamant.

On l'utilisera éventuellement en travaux de série dans divers matériaux durs (fig. 11.39).

L'usinage peut s'effectuer avec attaque sur des surfaces en différentes positions, voire peu accessibles.

Machines

Elles sont à pièce ou à laser mobile (fig. 11.40).

Avec une machine adaptée, les perçages peuvent s'effectuer dans toutes directions.

Laser employé en perçage

Du type solide pulsé YAG et verre dopé néodyme ou Alexandrite pour alliages cuivreux, avec possibilité de trépannage par perçages successifs.

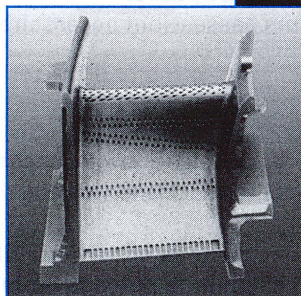
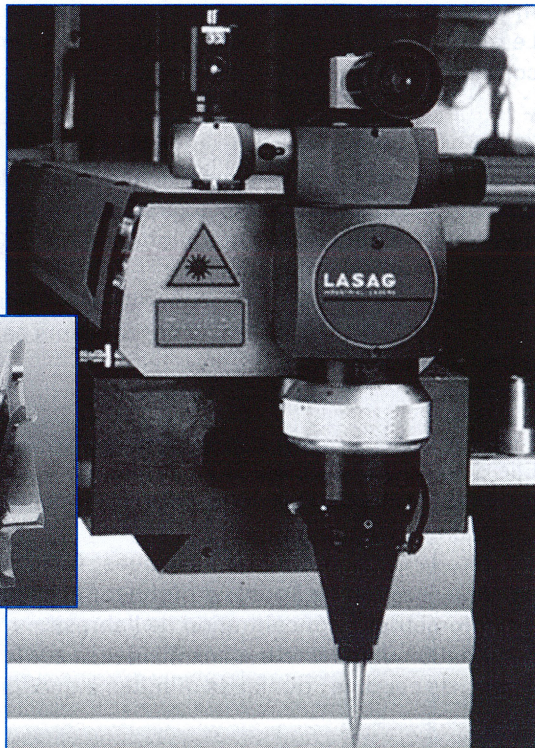


FIGURE 11.39

Opération de perçage au laser
(aube de turbine d'avion).

Doc. Lasag

FIGURE 11.40

Élément de machine d'usinage au laser
(perçage avec tête d'usinage BAK 4).

Doc. Lasag

Généralités

Microcassure de la matière par projection de particules de poudre abrasive en suspension dans un liquide, situées entre la pièce et un barreau-outil (la sonotrode) vibrant à fréquence élevée sous excitations ultrasoniques (voir « Procédés d'assemblage »).

La turbulence créée par la cavitation, qui résulte d'ondes de pressions et de dépressions successives en un même point, facilite la circulation de la solution abrasive.

La cavitation est provoquée par une densité de puissance acoustique (1 à 2 watts/cm² pour l'eau, à la fréquence de 20 000 Hz).

Énergie vibratoire

Elle est communiquée aux grains d'abrasif suivant l'avance de l'outil dans la pièce donnée par une légère pression.

Les grains d'abrasif sont en suspension dans la lame liquide (l'eau généralement) située entre la pièce et la sonotrode et qui vibre dans la même direction que la sonotrode.

Les mouvements vibratoires sont provoqués par un générateur d'ultrasons dont les vibrations électriques sont transformées en vibrations mécaniques par l'intermédiaire d'un transducteur. La sonotrode projette, comprime et martèle les grains d'abrasif sur la pièce, produisant les microruptures dans le matériau.

Le générateur électronique de courant basse fréquence, réglable en puissance, fournit un signal compris entre 20 000 et 40 000 hertz.

À l'extrémité de la sonotrode est fixé un embout de la forme du profil à obtenir en perçage (rond, carré, hexagonal...) qui reçoit le mouvement d'avance rectiligne alternatif (sans autre mouvement).

Le matériau utilisé pour l'embout est généralement en laiton ou en acier non trempé (pas de contact avec la pièce).

Abrasif utilisé

Il doit être plus dur que le métal usiné ; généralement le carbure de bore (le plus dur, après le diamant, léger, résistant aux agents chimiques et de point de fusion élevé).

Il est utilisé en poudre de granulométrie (de 120 à 600) choisie en fonction de la matière à usiner et de la précision à obtenir.

Le perçage s'effectue généralement en une seule passe.

Pour obtenir une grande précision, plusieurs passes sont nécessaires avec des granulométries différentes.

Vitesse d'avance

Elle dépend du volume de matière à enlever et de contraintes technologiques.

Il est préférable de percer des formes de petites sections.

Contraintes technologiques

Amplitude et fréquence des vibrations ; force statique entre la sonotrode et la pièce ; matériau à usiner ; section de l'outil ; profondeur et section de perçage (volume de matière à enlever) ; granulométrie et concentration de l'abrasif.

La variation d'un facteur a une incidence sur le temps d'usinage.

Temps de perçage : quelques minutes à quelques secondes (faibles profondeurs).

Précisions obtenues

Dimensionnelle

Elle est fonction de l'embout (outil de forme travaillant en pénétration). Elle peut atteindre 5 à 10 μm .

État de surface

Elle est fonction de la force statique appliquée sur la sonotrode, de la granulométrie de l'abrasif et de l'amplitude des vibrations.

La rugosité des parois de trous augmente avec l'amplitude des vibrations de la sonotrode.

Une légère conicité des trous résulte du cheminement des grains d'abrasif le long de l'outil et des vibrations transversales.

Utilisation

Perçages de petites sections de forme quelconque, dans des matériaux très durs, cassants, fragiles (verre, céramique, carbures, silicium, germanium...) sans contraintes d'usinage (thermique, chimique, mécanique) et ne pouvant pas être obtenus avec des procédés conventionnels.

Machines

De puissance entre 75 et 1 200 watts ; mouvement d'avance de broche avec guidage à haute précision ; réglage de la pression d'avance ; avec système d'injection et recyclage du liquide abrasif.

Broche animée en rotation. Possibilité d'effectuer de petites fraises.

Certaines machines peuvent être équipées de plusieurs broches, pour optimiser des usinages.

