

**UNIVERSITE DE MOHEMED KHIDER BISKRA
FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

COURS : Procédés de mise en forme des métaux

Troisième licence métallurgie

Dr. Lemmadi Fatima Zohra

Année universitaire

2025-2026

Introduction pédagogique

Ce cours de **Procédés de mise en forme des métaux** est destiné aux étudiants de troisième année Licence, spécialité métallurgie. Il s'inscrit dans le cadre de la formation fondamentale et appliquée visant à doter l'étudiant des connaissances scientifiques et techniques nécessaires à la compréhension des procédés industriels de transformation des métaux et alliages.

L'objectif principal de ce module est de permettre aux étudiants d'analyser les mécanismes de déformation plastique, de comprendre l'influence des paramètres opératoires sur la microstructure et les propriétés mécaniques, et de maîtriser les principes de base des procédés tels que le forgeage, la fonderie, la coulée continue et la métallurgie des poudres.

À l'issue de ce cours, l'étudiant sera capable de :

- Identifier et comparer les différents procédés de mise en forme ;
- Choisir le procédé approprié en fonction des exigences industrielles ;
- Évaluer l'impact des conditions de transformation sur la qualité du produit final ;
- Relier les aspects théoriques aux applications industrielles réelles.

Table des matières

Chapitre 1 : la coulée continue	5
Introduction :	5
I.1.Définition de la coulée continue des métaux	5
I.2.Les types de la coulée continue :	5

I.2.1. Coulée continue de brames	5
I.2.2. Coulée continue de billettes	5
I.2.3. Coulée d'ébauches de Bloom et de Beam	6
I.3. Mécanisme de fonctionnement de la coulée continue	6
I.3. Adoucisseurs de coulée continue :	7
I.3.1. Oscillation de la lingotière :	7
II.3.2. Lubrifiant	7
I.4. Les différentes méthodes de coulée de l'acier	8
I.5. Techniques de contrôle et d'inspection des brames, blooms et billettes	8
I.6. Les défauts et les avantages de la coulée continue	9
I.6.1. Les défauts de la coulée continue :	9
Chapitre II : la fonderie	13
Introduction :	13
II.1. Définition :	13
II.2. Procédé de Fonderie	13
II.2.1. Élaboration du métal liquide	13
II.2.2. Préparation du moule	13
II.3. Type de fonderies	14
II.4. Le moulage	14
II.4.2 Moule :	15
Chapitre III : la métallurgie des poudres	20
Introduction :	20
III.1. Définition :	20
III.2. Classification des procédés en métallurgie des poudres :	21
III.2.2. Importance économique du matériau poudre	21
III.2.3. Influence des propriétés de la poudre	21
III.2.4. Techniques de caractérisation des poudres	22
III.2.-5. Le moulage par injection de poudres (MIP)	22
III.3. Compression isostatique :	22
III.4. Frittage	23
III.4.1. Paramètres de frittage	23
III.4.2. Energies motrices du frittage	24
Chapitre IV : forgeage matriçage	25
Introduction :	25
IV.1. Définition :	26
VI.2. Importance industrielle :	26
VI.3. Les types de forgeage des métaux	26
VI.3.1. Selon la température	27

VI.3.1.a. Forgeage à chaud	27
VI.3.1.b. Forgeage à tiède	27
VI.3.1.c. Forgeage à froid	28
VI.4.2. Classification selon l’outillage	29
VI.4.2. a .Forgeage libre	29
Figure VI. 8: Exemples de pièces obtenues par le procédé de forgeage libre.....	31
VI.4.2. b. Forgeage en matrice (ou forgeage d’estampage)	31
VI.4.2. c . Forgeage de précision	31
Reference bibliographie :.....	33

Chapitre 1 : la coulée continue

Introduction :

La coulée continue des métaux est un procédé industriel moderne de solidification qui permet de transformer directement le métal liquide en produits semi-finis tels que les brames, blooms ou billettes, sans passer par l'étape traditionnelle de moulage en lingotière suivie de laminage primaire. Ce procédé occupe aujourd'hui une place centrale dans l'industrie sidérurgique en raison de son rendement élevé, de la qualité métallurgique obtenue et de sa grande productivité.

I.1.Définition de la coulée continue des métaux

La coulée continue des métaux est un procédé de solidification industrielle dans lequel le métal liquide est transformé de manière ininterrompue en produits semi-finis (brames, blooms ou billettes) par refroidissement progressif dans un moule refroidi à l'eau, suivi d'une solidification complète au cours de son extraction continue.

Contrairement à la coulée traditionnelle en lingots, la coulée continue permet d'obtenir directement une section définie, avec un meilleur rendement, une réduction des pertes de matière et une amélioration de la qualité métallurgique.

I.2.Les types de la coulée continue :

I.2.1. Coulée continue de brames

La coulée continue est un processus qui permet de produire de larges plaques de produit qui sont ensuite laminées en feuilles, plaques ou bobines. Ces brames trouvent des applications dans la construction, la construction navale et la fabrication de véhicules.

Ces rouleaux utilisés pour la coulée de brames sont capables de fournir un rendement élevé avec une épaisseur et une largeur constantes du produit à traiter ultérieurement.

I.2.2.Coulée continue de billettes

La coulée de billettes est conçue pour former des sections carrées ou presque carrées pour les barres, les tiges et plusieurs matériaux de renforcement. Dans la plupart des cas, les fondeurs de billettes travaillent avec des torons multiples afin d'améliorer l'efficacité du travail. La coulée en lingotière permet de créer des matériaux solides, de taille régulière et économiques.

I.2.3. Coulée d'ébauches de Bloom et de Beam

Un bloom est une pièce de fonderie de taille moyenne destinée à la fabrication de poutres et de rails. Une ébauche de poutre est une pièce moulée de forme presque nette destinée à la fabrication de poutres en I et en H. Ces techniques de moulage nécessitent moins de traitement intermédiaire, mais garantissent une grande précision des dimensions et des propriétés.

I.3. Mécanisme de fonctionnement de la coulée continue

La machine de coulée continue est composée d'un moule sans fond en cuivre appelé lingotière (repère numéro 3 sur la figure 1). Elle sert à solidifier l'acier à son contact. Pour cela, elle est parcourue par un réseau de canaux dans lesquels circule de l'eau afin de la refroidir en permanence. L'acier liquide est injecté par le haut de la lingotière par la busette (repère numéro 1). Au contact de la paroi de la lingotière, la température de l'acier liquide diminue ce qui entraîne sa solidification. Cette solidification se propage donc de la paroi de la lingotière vers le cœur du produit et l'épaisseur solide est proportionnelle au temps de séjour dans la lingotière. Par conséquent, comme l'acier avance dans la lingotière et que celle-ci est refroidie, l'épaisseur solidifiée est plus importante en bas qu'en haut de la lingotière. L'acier se trouvant au centre du produit reste liquide. La partie d'acier solide qui enveloppe la partie liquide s'appelle la peau solide. Un ensemble de rouleaux dit "rouleaux extracteurs" (repère numéro 2) situé juste en dessous de la lingotière permet de guider et de tirer sur le produit partiellement solidifié par le bas de la lingotière pour l'extraire en continu.

Un refroidissement par pulvérisation d'eau sur la surface de l'acier permet de terminer la solidification. À l'extrémité de la machine, le produit est découpé en morceaux selon la taille voulue.

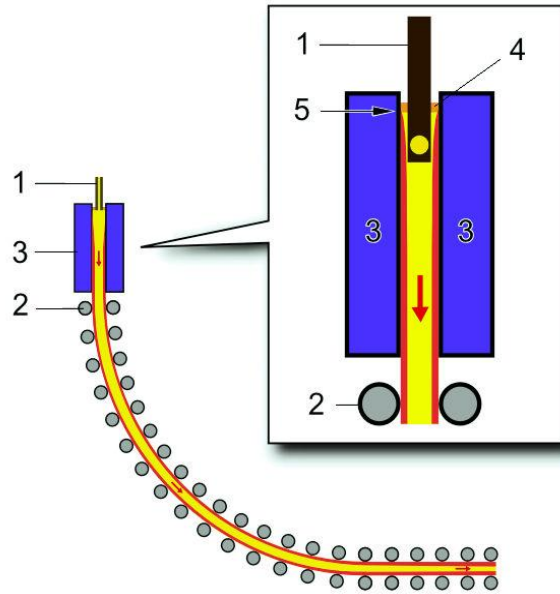


Figure I. 1 :Mécanisme de fonctionnement de la coulée continue

I.3. Adoucisseurs de coulée continue :

I.3.1. Oscillation de la lingotière :

Alors que le produit avance en continu entre les rouleaux, la lingotière est pourvue d'un mouvement oscillatoire vertical. Ce mouvement est la pour faciliter la lubrification et pour recoller les déchirures éventuelles de la peau lors des collages (ce phénomène sera détaillé un peu plus tard). Cette oscillation permet d'avoir une variation de vitesse relative entre le produit et la lingotière. Elle peut être décrite par deux phases : la phase de descente de la lingotière, lorsque cette dernière va plus vite que le produit que l'on appelle "le stripage négatif" et le reste de l'oscillation qui s'appelle "le stripage positif". Ce dernier correspond a la durée pendant laquelle la lingotière remonte ajoutée a la durée ou elle descend moins vite que le produit.

II.3.2.Lubrifiant

Afin de faciliter l'extraction du produit, de limiter les collages et d'isoler thermiquement le ménisque (surface libre de l'acier liquide repère par le numéro 5 sur la figure 1.1),

un lubrifiant en poudre est déposé a la surface libre de l'acier en haut de la lingotière (repère numéro 4). Il permet ainsi de faire barrage entre l'air et l'acier liquide, limitant l'oxydation du métal et la formation d'inclusion non métallique. Au contact de l'acier,

le lubrifiant se liquéfie et s'introduit entre la lingotière et la peau solide, surtout lors de la phase descendante de l'oscillation de la lingotière

I.4. Les différentes méthodes de coulée de l'acier

L'acier en fusion (env. 1600°C) peut être coulé de différentes façons :

I.4.1. Par injection sous pression dans un moule mécanique à l'aide d'un piston, ce type de moulage permet de fabriquer en petite série des pièces légères.

I.4.2. Par coulage au moyen d'une louche ou d'une poche en fonderie, lorsqu'il faut produire une quantité limitée de pièces, voire un prototype.

I.4.3. La coulée en lingot : le lingot est un moule de grande dimension dont l'intérieur est recouvert de réfractaire. Une fois démoulé, le lingot d'acier est prêt à être laminé.

I.4.4. La coulée continue est désormais la méthode la plus utilisée par l'industrie sidérurgique.



Figure 2 : Billettes produites par le procédé de coulée continue.

I.5. Techniques de contrôle et d'inspection des brames, blooms et billettes

Dans la plupart des processus de fabrication, des tests de qualité sont effectués pour s'assurer que les produits de la coulée continue répondent aux exigences en matière de propriétés mécaniques, de taille et de facteurs métallurgiques.

-Inspection visuelle

Les inspections de surface fournissent des indications sur les éventuelles lacunes, fissures ou inclusions. C'est essentiel pour éviter les retouches et maintenir un processus de coulée stable.

-Dimensionnement et essais mécaniques

Des instruments d'essai de précision vérifient la largeur, l'épaisseur, la rectitude, la résistance à la tension, la dureté et la résistance aux chocs, selon les besoins.

-Analyse métallurgique et chimique

L'analyse de la structure interne permet de détecter la ségrégation ou la porosité, et l'analyse chimique garantit que le produit répondra à la composition requise.

I.6 .Les défauts et les avantages de la coulée continue

I.6.1.Les défauts de la coulée continue :

Après avoir présenté le principe et le fonctionnement de la coulée continue, nous abordons à présent les principaux défauts susceptibles d'apparaître au cours du procédé. Ces défauts peuvent être classés en défauts internes, défauts de surface et défauts liés aux paramètres opératoires, comme suit :

Défauts internes

Ségrégation chimique

- Mauvaise répartition des éléments d'alliage.
- Apparition de zones enrichies ou appauvries en certains éléments.
- Provoque une hétérogénéité des propriétés mécaniques.

Porosités internes

- Formation de cavités dues :
 - au retrait de solidification,
 - à des gaz dissous.
- Diminue la résistance mécanique.

Fissures internes

- Causées par :

- des contraintes thermiques élevées,
- un refroidissement mal contrôlé.
- Souvent difficiles à détecter.

Défauts de surface

Fissures longitudinales

- Se forment parallèlement au sens de coulée.
- Provoquées par un refroidissement non uniforme.

Fissures transversales

- Perpendiculaires au sens de coulée.
- Liées aux contraintes thermiques et à la fragilité à chaud.

Marquages d'oscillation

- Stries sur la surface dues au mouvement oscillant de la lingotière.

Inclusion non métallique

- Présence d'oxydes, sulfures ou autres impuretés.
- Affecte la qualité du produit final.

Défauts liés au procédé

Collage à la lingotière

- Mauvaise lubrification.
- Risque de rupture de la peau solidifiée (breakout).

Déformation du produit

- Ovalisation des brames ou des billettes.
- Mauvais alignement des rouleaux.

Coût d'installation élevé

- Investissement important en équipements.
- Maintenance spécialisée nécessaire.

Limites générales

- Procédé peu flexible pour petites séries.
- Sensible aux variations de température.
- Nécessite un contrôle très précis des paramètres (vitesse de coulée, refroidissement secondaire, composition chimique).

I.6.2. Les avantages de la coulée continue

Après avoir examiné les limites et les défauts associés au procédé, il convient également de mettre en évidence les nombreux avantages de la coulée continue. En effet, ce procédé représente une avancée technologique majeure dans l'industrie métallurgique moderne, notamment dans la production de l'acier et des alliages non ferreux. Son développement a permis d'améliorer considérablement la productivité, la qualité métallurgique et l'efficacité énergétique des unités de transformation. Les principaux avantages de la coulée continue peuvent être présentés comme suit :

Productivité élevée

- Procédé continu sans interruption entre la solidification et la mise en forme primaire.
- Suppression des étapes intermédiaires (coulée en lingots + réchauffage).
- Réduction du temps de production.
- Adapté aux grandes capacités industrielles.

Amélioration du rendement matière

- Réduction des pertes métalliques (moins de chutes et de masselottes).
- Suppression des têtes et pieds de lingots.
- Meilleur taux d'utilisation du métal liquide.

Le rendement matière est nettement supérieur à celui de la coulée en lingotière traditionnelle.

Qualité métallurgique améliorée

- Solidification dirigée et contrôlée.
- Structure plus homogène.
- Diminution des retassures macroscopiques.

- Meilleur contrôle de la composition chimique.

Réduction des coûts énergétiques

- Suppression du réchauffage des lingots avant laminage.
- Intégration directe avec le train de laminage (coulée-laminage).
- Diminution de la consommation globale d'énergie.

Automatisation et contrôle précis

- Paramètres contrôlés en temps réel (vitesse de coulée, refroidissement secondaire, température).
- Surveillance continue de la qualité.
- Procédé hautement mécanisé et sécurisé.

Amélioration des conditions industrielles

- Procédé plus propre que la coulée traditionnelle.
- Réduction des manipulations lourdes.
- Meilleure sécurité opérationnelle.

Chapitre II : la fonderie

Introduction :

La fonderie est un procédé de mise en forme qui consiste à couler un métal à l'état liquide dans un moule ayant la forme de la pièce à obtenir. Après solidification et refroidissement, on obtient une pièce brute appelée pièce moulée.

La fonderie est l'un des procédés les plus anciens de transformation des métaux et reste aujourd'hui largement utilisée dans les secteurs :

- Automobile
- Aéronautique
- Construction mécanique
- Industrie énergétique

II.1.Définition :

La fonderie est l'un des procédés de mise en forme des métaux, notamment la coulée de métal ou d'alliage liquide dans un moule pour reproduire une pièce donnée après refroidissement, tout en limitant au maximum les travaux de finition ultérieurs. La technologie utilisée dépend de l'alliage fondu, de la taille, des caractéristiques et de la quantité des pièces à produire. Il s'agit le plus souvent d'une industrie de sous-traitance qui s'appuie fortement sur les services achats : automobile, sidérurgie, matériel de manutention, matériel industriel, matériel

II.2. Procédé de Fonderie

II.2.1. Élaboration du métal liquide

Fusion dans un four (four à induction, four électrique, cubilot).

II.2.2. Préparation du moule

- Fabrication de l'empreinte
- Mise en place du système d'alimentation
- Mise en place des noyaux

Coulée

Le métal liquide est versé dans le moule.

-Solidification

Formation de la structure métallurgique.

-Décochage

Extraction de la pièce.

- Finition

- Ébarbage
- Traitement thermique
- Usinage

II .3. Type de fonderies

Dans la spécialisation de la fonderie, on distingue pratiquement les fonderies suivantes :

- **Selon la nature des métaux et alliages :**

- Fonderie de fonte et de l'acier.
- Fonderie d'aluminium et ses alliages.
- Fonderie de cuivre, bronzes, laitons etc...

- **Selon l'utilisation :**

- Fonderie d'art.
- Fonderie d'ornement (bijoux).
- Fonderie de mécanique industrielle.
- Selon le procédé de moulage :
 - Moulage en sable (manuel ou mécanique).
 - Moulage en carapaces.
 - Moulage à la cire perdue.
 - Moulage en coquilles (moule permanent)

II.4. Le moulage

Définition :Le moulage est l'action de prendre une empreinte qui sera utilisée comme moule, le matériau y sera placé et plusieurs copies du modèle pourront être imprimées ou produites.

L'impression consiste donc à placer des matériaux (liquide, pâte, poudre, feuilles, plaques, etc.) dans un moule qui prendra cette forme. L'opération de moulage comprend la réalisation d'un moule, généralement en matériau réfractaire, avec une empreinte négative de la pièce, qui est obtenue à partir d'un modèle copian



Figure II.1. Le procédé de moulage

la pièce à fabriquer. Selon le modèle, il détermine la forme, la taille et la précision des pièces à couler, les conditions de surface, le refroidissement, et joue un rôle important dans un grand nombre de paramètres qui affectent sa qualité.

II.4.2 Moule : Le moule est utilisé pour effectuer le processus de moulage, dont l'un est le moulage en sable, qui utilise un moule en sable spécial comme empreinte négative pour produire les pièces requises. 1.4.3

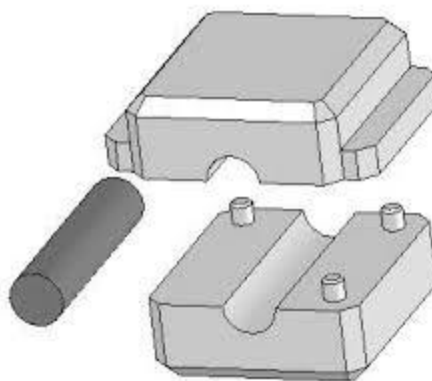


Figure II.2.: Elaboration d'un model

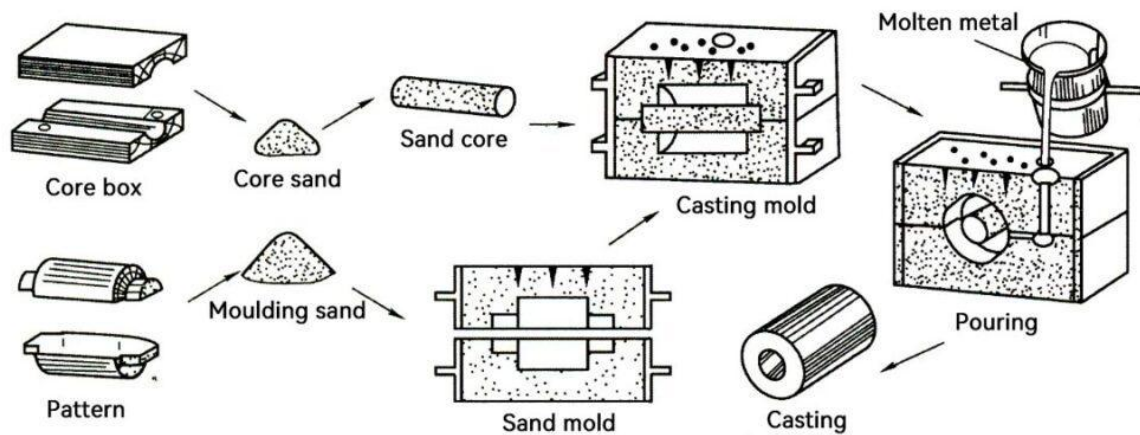
Types de moule : Dans ces procédés le moule peut-être permanent ou non permanent (destructible). ●

-Les moules non permanents ne sont utilisés qu'une seule fois. Pour sortir les pièces, il faut les détruire. L'empreinte est obtenue par moulage des matériaux constitutifs autour du modèle en bois ou en métal.

-**Le moule permanent** peut être utilisé plusieurs fois et il est fabriqué en plusieurs parties pour faciliter le retrait des pièces. Il est particulièrement adapté aux situations où le nombre de pièces à couler est important

Moules non permanents :avec un modèle non permanent Un moule non permanent avec un modèle non permanent est que le moule sera utilisé pour produire une seule pièce. Le modèle ne permettra la fabrication que d'un seul moule.

Moulage à la cire perdue La pièce à couler doit être tout d'abord reproduite en cire. Pour se faire la forme de la pièce est usinée à l'intérieur d'un moule en aluminium. On pulvérise une poudre spéciale sur les surfaces. Ce moule est placé sur un appareil d'injection de cire liquide. Lorsque la cire se solidifie, le moule est ouvert pour contrôler la pièce en cire. Une fois les pièces de cire obtenues, elles sont assemblées en grappe. Cette étape nécessite de la minutie et de la patience. On trempe ensuite la grappe dans une barbotte de cire liquide avant de la saupoudrer dans le sable réfractaire. On répète cette étape jusqu'à l'obtention d'une carapace assez solide pour résister à la coulée. Une fois la carapace obtenue, elle est placée dans un four pour faire fondre la cire. Nous obtenons une carapace vide qui a exactement la forme de la pièce à couler. Pour éliminer toute trace d'humidité, les carapaces sont retournées au four pour une cuisson finale. Les moules ainsi produits peuvent être utilisés directement pour couler les pièces (figure 2.1).



Sand Casting Diagram

Figure II.3. : types de procédés de moulage

Moulage en sable : Le moulage au sable est un processus de coulée de métal, qui se caractérise par l'utilisation de sable comme matériau de moule. Le processus consiste à obtenir des pièces métalliques en versant du métal fondu dans une cavité créée à l'intérieur d'un moule puis laisser refroidir pour que la pièce obtenue durcisse. La destruction du moule est impérative. Les pièces moulées au sable sont produites dans des usines spéciales de fonderie. Elles sont relativement bon marché. Le moule est généralement en deux parties. Après remplissage, refroidissement et destruction du moule on effectue sur la pièce obtenue un ébarbage, c'est à dire enlever le système d'alimentation, les éventails pour obtenir la pièce brute et après l'usinage des surfaces fonctionnelles dans des ateliers de fabrication mécanique on aura la pièce finie. Ces types de moulage convient à tous les métaux coulés, en particulier ceux à point de fusion élevé (fonte et acier), il convient aux pièces monobloc et à la petite et moyenne série.

II.5.Eléments pour la constitution le moule

Qualité de moule : L'objectif est d'éviter le gonflement du moule sous l'action des hautes pressions liquides exercées par le refroidissement et la solidification de la fonte à graphite. - Les moules en sable vert et en coquille ne résisteront pas à la pression de solidification, s'ils

sont bien préparés les sables liés chimiquement résisteront à la pression, cela nécessite un serrement mécanique du sable pendant la préparation du moule et une prise convenable. - Les moules en sable ciment ou sec résisteront habituellement à la pression créée par la solidification de la fonte.

Châssis : C'est un cadre rigide en fonte, en acier ou en aluminium, parfois en bois, et qui n'a pas de fond pour retenir et supporter le sable qui compose le moule. Un châssis complet comprend au moins deux parties.

Modèle : Le modèle est une représentation de la pièce ou d'un groupe de pièces à fabriquer et il permet la réalisation d'une empreinte dans un moule en sable. Il est en bois ou en métal selon les plans de fabrication, éventuellement en deux parties et peut être réutilisé. Il doit avoir :

Une bonne résistance aux contraintes mécaniques, chimiques (humidité, adhérence du sable, gaz, etc.) et thermiques (chauffage du modèle dans divers procédés de moulage) - Une bonne précision de la forme et de la taille. - Bon prix de revient.

Sables de fonderie Le sable utilisé dans la fonderie doit répondre à un certain nombre d'exigences : - Reproduire fidèlement la pièce modèle, - Grosseur du grain aussi fine que possible, - Ne pas se désintégrer lors de l'extraction du modèle, - Résister à la température de coulée élevée du métal, - Résister à l'érosion de la coulée de métal liquide, - Avoir perméabilité suffisante pour permettre la coulée,

Le gaz produit dans le processus passe à travers, - Facile à libérer. Les sables de fonderie sont généralement composés de : - 70 à 80 % de silice \ support - 5 à 15% d'argile \ agglutinant - 7 à 10% d'eau - 3 à 5% d'impuretés (oxyde de fer, matières organique, etc.)

Noyau et boîte à noyau : Afin d'obtenir le profil interne de la pièce, un noyau est utilisé et placé dans le moule. Lorsque la pièce présente des encoches difficiles à obtenir par moulage naturel ou même impossibles à obtenir. Le noyau est fait de sable auto-séchant, placé dans un moule appelé boîte à noyau métallique (figure 2.6), et se compose de deux parties assemblées par des goupilles de positionnement.

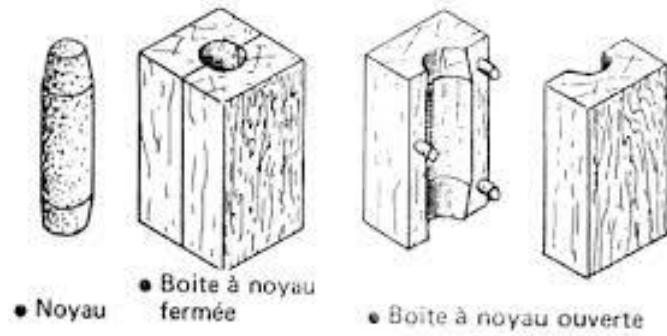


Figure II.4. : Noyau et boîte à noyau

Plan de joint : C'est le plan de jonction entre les deux parties du moule. On choisit le sens du plan de joint tel que : - Eviter les contre-dépouilles (pour rendre le démoulage du modèle possible et ceci implique nécessairement le passage du plan de joint par la plus grande section de la pièce

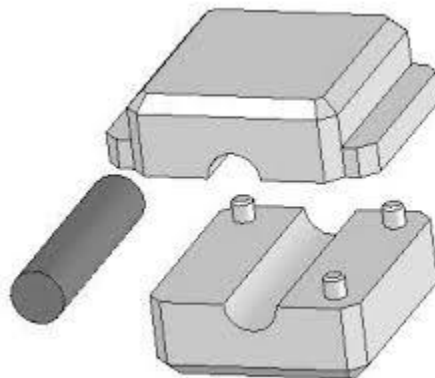


Figure II.5. : moule

Chapitre III : la métallurgie des poudres

Introduction :

La Métallurgie des Poudres (MdP) est une technologie en continuelle et rapide évolution qui concerne la plupart des matériaux métalliques et alliages, et une grande variété de forme de pièces.

La Métallurgie des Poudres est une méthode bien établie pour fabriquer des composants fiables ferreux et non ferreux. Ils sont obtenus en mélangeant des poudres élémentaires ou d'alliages, en donnant à ce mélange une forme par compactage ou injection puis en faisant subir à cette pièce formée un traitement thermique autrement appelé "frittage" dans un four sous atmosphère contrôlée.

III.1. Définition :

La métallurgie des poudre est un procédé d'élaboration et de mise en forme La métallurgie des poudres des métaux qui consiste à produire des pièces métalliques à partir de poudres fines, consolidées par compression puis densifiées par traitement thermique sans atteindre l'état liquide.

Contrairement aux procédés conventionnels tels que la fonderie ou le forgeage, cette technique repose sur la **liaison interparticulaire par diffusion solide**, permettant d'obtenir des matériaux aux propriétés contrôlées (porosité, composition, microstructure).

Elle est particulièrement utilisée pour la fabrication de pièces de précision, de matériaux composites métalliques et d'alliages difficiles à élaborer par voie liquide.

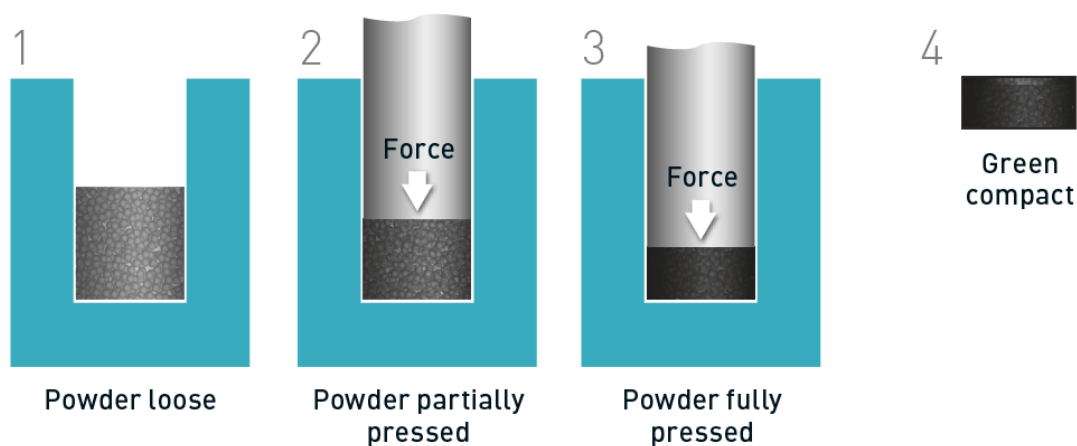


Figure III.1.principe de la métallurgie de poudre

III.2. Classification des procédés en métallurgie des poudres :

La métallurgie des poudres est un terme générique couvrant plusieurs procédés utilisés lors de la fabrication de composants métalliques à partir de poudres métalliques. Les principaux procédés sont les suivants :

III.2. 1.La fusion sur lit de poudre

La fusion sur lit de poudre est un procédé de **fabrication additive** dans lequel une source d'énergie à haute densité, telle qu'un faisceau laser ou un faisceau d'électrons, est utilisée pour faire fondre sélectivement des particules de poudre. Ces particules se solidifient ensuite couche par couche afin de construire une pièce tridimensionnelle.

Les matériaux utilisés peuvent être des métaux, des céramiques ou des polymères. Parmi les principales techniques appartenant à cette famille, on distingue :

- La fusion sélective par laser (SLM)
- La fusion par faisceau d'électrons (EBM)

III.2.2. Importance économique du matériau poudre

Dans les procédés sur lit de poudre, notamment pour les métaux, le coût de la poudre peut représenter jusqu'à un tiers du coût total de fabrication de la pièce finale.

Ainsi, la rentabilité industrielle du procédé dépend fortement :

- d'une chaîne d'approvisionnement fiable en poudre métallique,
- de stratégies efficaces de recyclage des poudres non utilisées.

III.2.3. Influence des propriétés de la poudre

Les propriétés physiques et chimiques de la poudre (taille des particules, forme, distribution granulométrique, pureté chimique, fluidité, etc.) ont une influence directe sur :

- La stabilité du processus de fabrication,
- La qualité métallurgique de la pièce finale (densité, porosité, microstructure, propriétés mécaniques).

Pour garantir un procédé robuste et reproductible, ces caractéristiques doivent être rigoureusement contrôlées et optimisées.

III.2.4. Techniques de caractérisation des poudres

La caractérisation des poudres est réalisée à différentes étapes : développement de nouveaux alliages, production industrielle et recyclage des poudres.

Parmi les principales techniques analytiques utilisées :

- La diffraction laser (analyse de la distribution granulométrique),
- L'analyse d'images automatisée (forme et morphologie des particules),
- La fluorescence X (analyse chimique),
- La diffraction des rayons X (analyse de la structure cristalline).

III.2.-5. Le moulage par injection de poudres (MIP)

Le moulage par injection de métal (MIM) est un procédé de fabrication qui consiste à mélanger des poudres métalliques fines avec un liant pour former une pâte appelée *feedstock*. Cette pâte est injectée dans un moule pour obtenir une forme appelée « pièce verte ». Ensuite, le liant est éliminé (déliantage), puis la pièce est chauffée (frittage) pour devenir solide et dense.

III.3. Compression isostatique :

La compression isostatique est une méthode utilisée pour améliorer la qualité des pièces fabriquées à partir de poudres métalliques. Elle consiste à appliquer une pression uniforme dans toutes les directions sur une poudre placée dans un moule fermé, à l'aide d'un liquide ou d'un gaz.

Il existe deux types :

- **Compression isostatique à froid (CIF)** : consiste à compacter une poudre métallique en appliquant une pression uniforme dans toutes les directions, à température ambiante, à l'aide d'un fluide (souvent de l'eau ou de l'huile)..

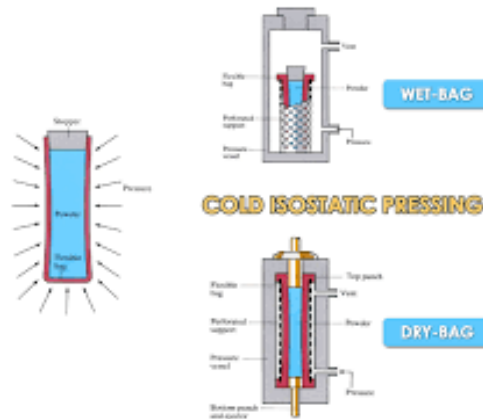


Figure III.3. Compression isostatique à froide

- **Compression isostatique à chaud (CIC) :** réalisée à haute température pour obtenir des pièces plus denses et résistantes.

Cette technique permet d'obtenir des pièces avec une densité uniforme et de meilleures propriétés mécaniques que les méthodes classiques. Cependant, il est important de bien contrôler les caractéristiques de la poudre utilisée pour assurer un bon résultat.

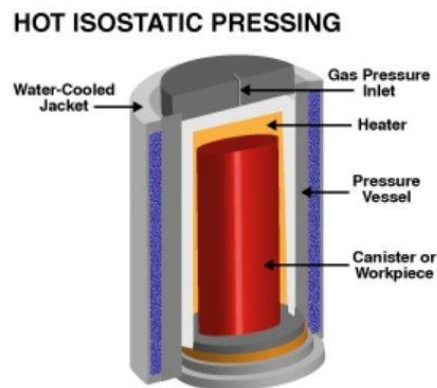


Figure III.4. Compression isostatique à chaud

III.4. Frittage

Le frittage est un traitement thermique employé pour la consolidation des pièces

à vert suite à une élévation de la température, ce qui a pour effet de densifier le matériau et de rehausser ses propriétés mécaniques. Il s'effectue à une température inférieure à celle de

fusion du constituant principal. Lors du frittage les grains s'unissent et se renforcent entre eux, avec formation de joints de grains et élimination de la porosité.

III.4.1. Paramètres de frittage

III.4.1.1. Atmosphère de frittage

L'atmosphère de frittage est le gaz ou le vide dans lequel on chauffe une pièce en poudre métallique. Elle sert à protéger le métal de l'oxydation et à améliorer la densité de la pièce.

- ✓ **Vide** : utilisé pour des métaux sensibles comme le titane ou l'aluminium.
- ✓ **Gaz inerte** (argon, azote) : protège le métal sans le réagir.
- ✓ **Gaz réducteur** (hydrogène) : supprime les oxydes à la surface des poudres, utile pour l'acier ou le cuivre.

Le choix de l'atmosphère est important pour obtenir une pièce solide, dense et avec de bonnes propriétés mécaniques.

III.4.1.2. Température de frittage :

La température de frittage des matériaux métalliques correspond à la température à laquelle une poudre métallique est chauffée afin de provoquer la diffusion des atomes entre les particules, sans atteindre leur point de fusion. Elle est généralement comprise entre 70 % et 90 % de la température de fusion du métal (exprimée en Kelvin), ce qui permet d'assurer la cohésion et la densification progressive de la pièce. Le choix de cette température dépend de plusieurs paramètres, notamment la nature du matériau, la taille et la morphologie des particules, ainsi que l'atmosphère de frittage (vide ou gaz protecteur)

Exemples de températures de frittage

- Fer (Fe) : environ 1100 – 1300 °C
- Acier : environ 1120 – 1250 °C
- Aluminium (Al) : environ 500 – 600 °C
- Cuivre (Cu) : environ 800 – 1000 °C
- Titane (Ti) : environ 1000 – 1300 °C

III.4.1.3. Durée de frittage

La durée de frittage est le temps pendant lequel une pièce est maintenue à haute température pour permettre la liaison des particules métalliques et sa densification. Elle varie généralement de quelques minutes à plusieurs heures selon le matériau et les conditions de traitement. Par

exemple, elle est d'environ 20 à 60 minutes pour les aciers, 30 à 90 minutes pour le cuivre, 10 à 30 minutes pour l'aluminium, et peut atteindre plusieurs heures pour le titane.

III.4.2. Energies motrices du frittage

L'énergie motrice du frittage désigne la force qui pousse les particules métalliques à se rapprocher et à se lier entre elles lors du chauffage, afin de réduire les vides et densifier la pièce. Cette énergie provient de l'instabilité des surfaces des particules, qui possèdent une grande énergie de surface. En cherchant à diminuer cette énergie, les particules forment des liaisons entre elles et combrent progressivement les espaces, ce qui augmente la densité et la résistance de la pièce finale. Plus les particules sont fines, plus leur énergie de surface est élevée, et plus le frittage est efficace et rapide.

Exemple : fabrication d'un engrenage en acier par MP

Poudre de fer + graphite + alliants (Cr, Mo) ;

Compactage dans moule à la forme finale de l'engrenage ;

Frittage à 1100-1200 °C sous atmosphère d'hydrogène ou azote ;

Trempe et revenu pour augmenter la dureté superficielle ;

Résultat : engrenage de précision, avec propriétés adaptées et coût réduit pour production de masse.



Figure III.5.: Exemples de pièces élaborées par la métallurgie des poudres

Chapitre IV : forgeage matriçage

Introduction :

Le forgeage est un procédé de mise en forme des métaux par déformations plastiques à chaud ou à froid. On chauffe le métal (fours) à une température convenable afin que le métal devient malléable et forgeable.

IV.1.Définition :

Le forgeage des métaux est un procédé de mise en forme qui consiste à déformer plastiquement un métal sous l'action de forces de compression, généralement appliquées par un marteau ou une presse, afin d'obtenir une pièce de forme déterminée sans enlèvement de matière.

Ce procédé peut être réalisé :

- à chaud (au-dessus de la température de recristallisation), à tiède,
- à froid, selon le matériau et les propriétés recherchées.

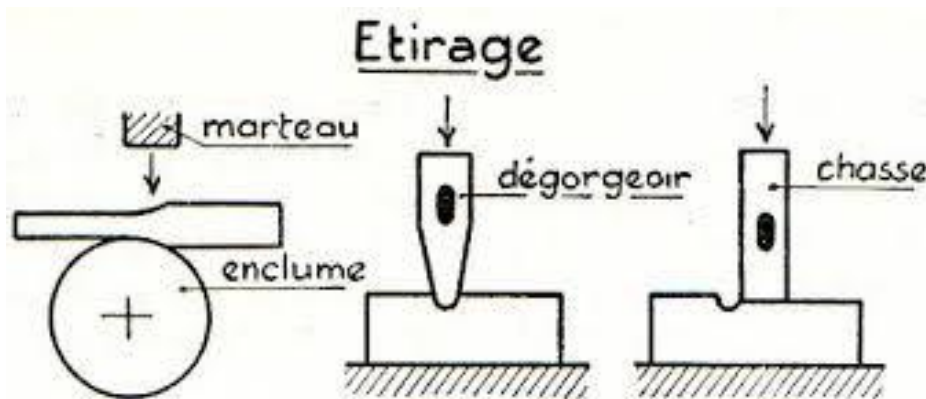


Figure VI.1. : le forgeage par marteaux

VI.2.Importance industrielle :

Le forgeage est très important dans l'industrie car il permet de fabriquer des pièces métalliques solides et résistantes. Grâce à la déformation plastique, le métal développe **des** propriétés mécaniques supérieures, comme une meilleure résistance à la traction et aux chocs. Il est utilisé pour produire des composants essentiels dans l'automobile (arbres de transmission, vilebrequins), l'aéronautique (trains d'atterrissage, pièces de turbines) et l'énergie (rotors, turbines). Le forgeage garantit également une **orientation optimale des fibres métalliques**, ce qui améliore la durabilité et la sécurité des pièces. Enfin, il permet de fabriquer des pièces avec des dimensions précises et fiables pour des applications industrielles exigeantes.

VI.3 . Les types de forgeage des métaux

Le **forgeage** peut être classé selon plusieurs critères : la température de travail, la configuration des outillages et le mode d'application de l'effort.

- Selon la température de déformation
- Selon la configuration des matrices

VI.3.1. Selon la température

VI.3.1.a. Forgeage à chaud

Définition : Le forgeage à chaud est un procédé de mise en forme des métaux réalisé à une température supérieure à la température de recristallisation du matériau.

À cette température élevée, le métal devient plus plastique et plus facile à déformer. Sous l'action d'efforts de compression (marteau-pilon ou presse), il se déforme sans se fissurer et sans s'écrouir de manière permanente, car la recristallisation élimine les effets de l'écrouissage.



Figure VI.2: principe de forgeage à chaud



Figure VI.3.: Exemples des pièces obtenues par le procédé de forgeage chaud

VI.3.1.b. Forgeage à tiède

Définition : Le forgeage à tiède est un procédé de mise en forme des métaux réalisé à une température intermédiaire, située entre le forgeage à froid et le forgeage à chaud. Il s'effectue généralement à une température comprise entre **0,3 et 0,5 de la température de fusion absolue du métal** (en Kelvin).

Ce procédé permet de réduire l'effort de déformation par rapport au forgeage à froid tout en conservant une meilleure précision dimensionnelle et un meilleur état de surface que le forgeage à chaud.



Figure IV.4: Exemple de principe de forgeage à tiède

Exemples : Pignons de boîte de vitesses arbres de transmission, Bielles, moyeux de roues, axes et arbres cannelés

VI.3.1.c. Forgeage à froid

Définition : Le forgeage à froid est un procédé de mise en forme des métaux réalisé à température ambiante ou légèrement élevée, c'est-à-dire en dessous de la température de recristallisation du métal.

Dans ce procédé, le métal est déformé plastiquement sous l'action d'efforts de compression importants, sans chauffage préalable important..

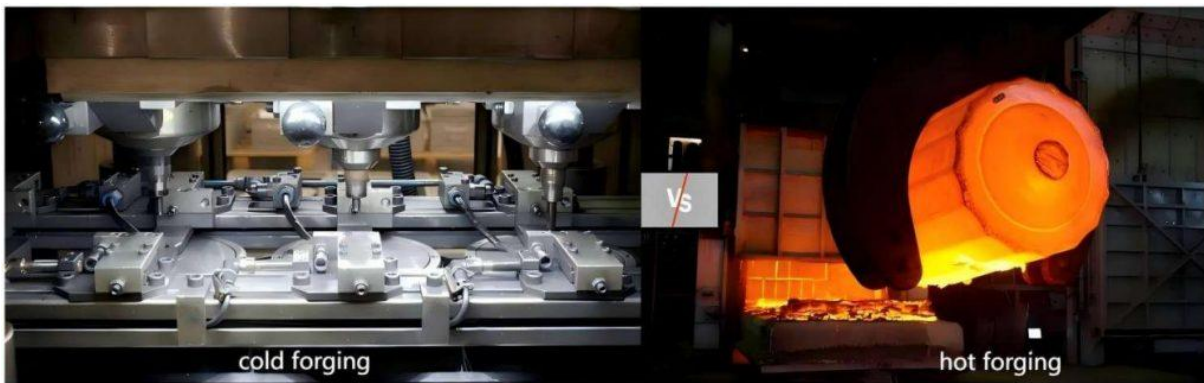


Figure VI .5: Principe de fonctionnement de forgeage à froid , chaud

Exemples : pièces de précision comme les vis, boulons et petites pièces automobiles.



Figure VI. 6: Exemples des pièces obtenues par le procédé de forgeage froid

VI.4.2. Classification selon l'outillage

VI.4.2. a .Forgeage libre

Définition : Le forgeage libre est un procédé de mise en forme des métaux par déformation plastique, réalisé à chaud ou à froid, dans lequel la pièce est comprimée entre des outils simples (généralement des enclumes ou des plateaux) sans empreinte fermée.

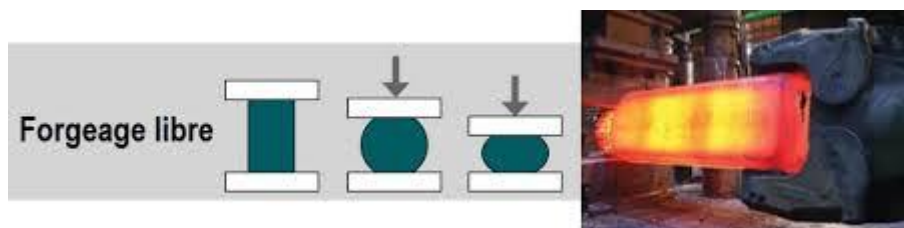


Figure IV.7: Principe de forgeage libre

Principe :

Le principe du forgeage libre repose sur la déformation plastique du métal sous l'action d'efforts de compression, appliqués à l'aide d'outils simples (marteau-pilon ou presse hydraulique)..Le fonctionnement se déroule généralement comme suit :

Chauffage du lopin

Le métal est chauffé (dans le cas du forgeage à chaud) à une température suffisante pour augmenter sa plasticité et réduire sa résistance à la déformation.

Mise en position sur l'enclume

La pièce est placée entre deux outils plats ou légèrement profilés.

-Application de la force de compression

Un effort vertical est appliqué par un marteau ou une presse. Sous cette pression, le métal s'écrase et s'allonge latéralement, car il n'est pas confiné par une matrice fermée.

Manipulation progressive

L'opérateur ou le système automatisé déplace et retourne la pièce entre chaque frappe afin d'obtenir progressivement la forme désirée (allongement, refoulement, perçage, etc.).

Finition éventuelle

La pièce peut subir un usinage complémentaire pour atteindre les dimensions finales.

Exemples : forgés industriels de grande taille (poutres, manchons).

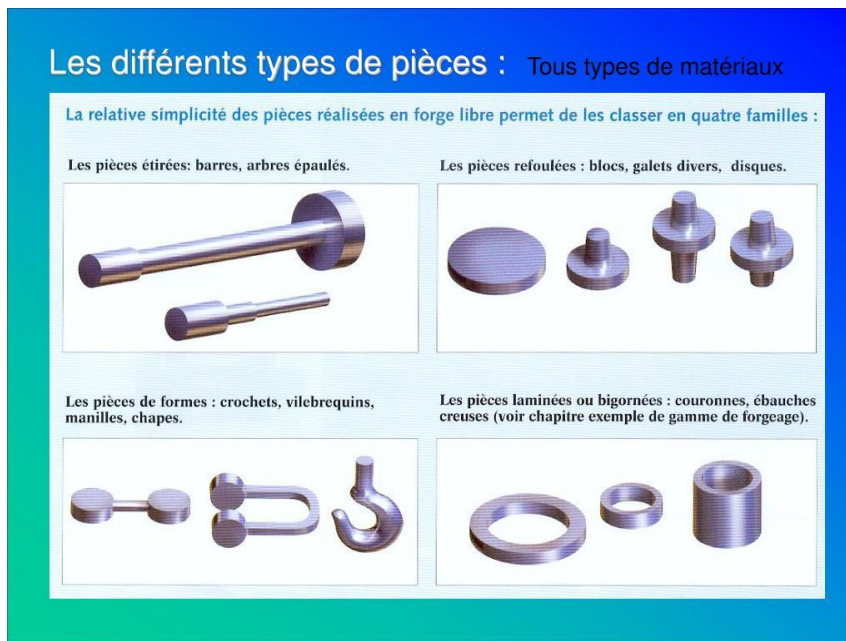


Figure VI. 8: Exemples de pièces obtenues par le procédé de forgeage libre.

VI.4.2. b. Forgeage en matrice (ou forgeage d'estampage)

Définition : Le forgeage par estampage est un procédé de mise en forme des métaux dans lequel le métal chauffé est déformé plastiquement entre deux matrices (empreintes) qui possèdent la forme négative de la pièce à obtenir.

Sous l'action d'une presse ou d'un marteau, le métal remplit complètement l'empreinte des matrices et prend ainsi la forme finale désirée.

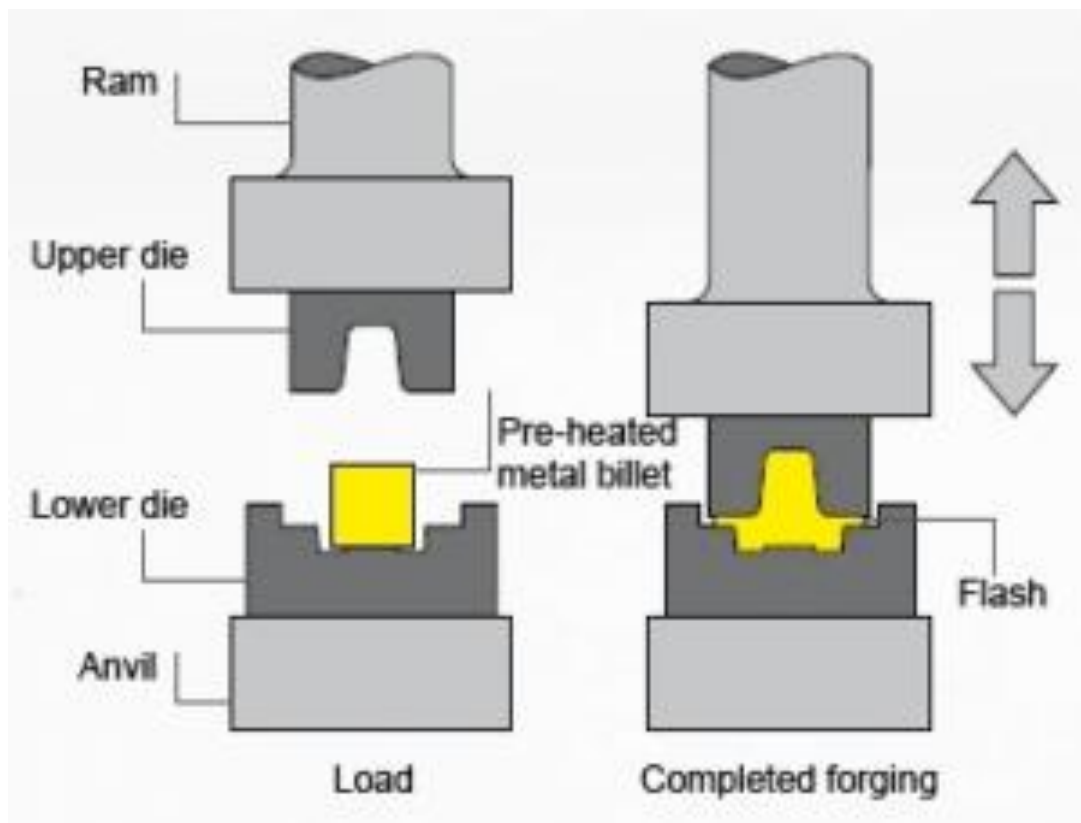


Figure IV. 9: Schéma illustrant le principe de fonctionnement du forgeage par estampage.

Exemples : manivelles, paliers, pièces automobiles complexes.

VI.4.2. c . Forgeage de précision

Définition :

Le forgeage sous pression est un procédé de mise en forme des métaux dans lequel le métal est déformé lentement et de manière continue sous l'action d'une pression hydraulique ou mécanique élevée, plutôt que par des coups répétés comme dans le forgeage au marteau. Il s'agit donc d'une déformation progressive sous pression constante, ce qui permet de produire des pièces avec une précision dimensionnelle élevée et une structure métallique homogène.

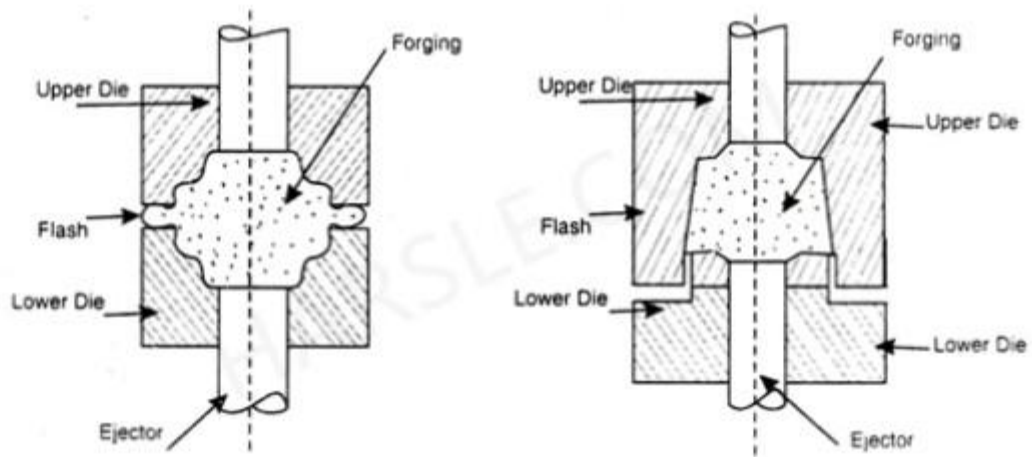


Fig. 5.22. Flash and Flashless hot pressing.

Figure IV.10. Principe de forgeage par pression

- **Exemples :** composants aéronautiques, pièces de turbines.

Reference bibliographie :

1. *Mise en forme des métaux : Plasticité, rhéologie, tribologie* , Eric Felder ,(2017)
2. *Metal Forming Processes: Fundamentals, Analysis, Calculations* Zainul Huda (2024)
3. Guide des techniques de moulage 2017
4. Procédés de mise en forme par moulage, **Mme GARA Souhir,:** (2017)