

La fonte coulée

en continu pour une fabrication innovante de pièces

KLAUS HERFURTH, SOLINGEN (ALLEMAGNE)

De nombreux exemples illustrent les avantages techniques et économiques de l'emploi de fontes à graphite lamellaire et sphéroïdal. Les avantages de ces matériaux ont été décrits principalement pour les pièces moulées. Cet article traite de profils ou de jets coulés en continu comme ébauches à partir desquelles des pièces de construction sont fabriquées pour de multiples applications. Les pièces en fonte coulées en continu ne sont pas normalisées à ce jour. C'est la raison pour laquelle quatre fonderies européennes de coulée continue ont établi, à l'initiative du Deutscher Gießereiverband (DGV) de Düsseldorf, un état de l'art de la coulée continue de fonte.

INTRODUCTION

▶▶ Dans le procédé de coulée continue de la fonte, le métal commence à se solidifier dans une filière en graphite à base ouverte refroidie à l'eau. Les conditions thermophysiques sont différentes de celles du moulage sable. Du fait de la vitesse de solidification plus importante, les propriétés des pièces sont différentes de celles obtenues en moulage sable, d'où l'obtention d'une structure particulièrement fine et homogène. Les jets coulés en continu se caractérisent par une excellente étanchéité aux gaz et aux liquides [1, 2]. Pour les jets coulés en continu, il n'existe aucune norme internationale (ISO), européenne (EN) ou nationale. Des représentants des quatre entreprises citées ci-après ont fait le point sur la production actuelle des jets en fonte coulés en continu et ont étudié une première recommandation en vue d'une future normalisation :

- ACO Guss, Kaiserslautern (D),
- Contifonte groupe Kuhn, Saverne (F),
- Gontermann-Peipers, Siegen (D),
- TASSO, Odense (Danemark)

Principe de la coulée continue

▶▶ Les jets en fonte à graphite lamellaire et sphéroïdal sont coulés selon le procédé de coulée continue horizontale. La figure 1 représente les trois principales parties de l'installation de coulée : le creuset avec la filière en graphite fixée par bride, interchangeable et refroidie à l'eau ; le moteur et le dispositif d'extraction à commande électronique ; le dispositif de tronçonnage et de casse des jets. La filière est l'élément le plus important ; elle a une influence directe sur l'état de surface, la forme des jets, la microstructure en fonction de la vitesse de refroidissement et sur la maîtrise de la qualité. Elle est constituée d'une forme en graphite emmanchée dans une coquille refroidie à l'eau. La capacité utile du creuset dépend des profils à produire et du cycle d'approvisionnement en fonte liquide. Dans le procédé de coulée continue, le creuset est alimenté à intervalles réguliers en fonte liquide pour permettre une production en continu. La fonte liquide prélevée du four de fusion peut subir différents traitements de sphéroïdisation et d'inoculation, avant d'être transférée dans le creuset. Selon la taille des jets et la vitesse d'extraction, ce processus est

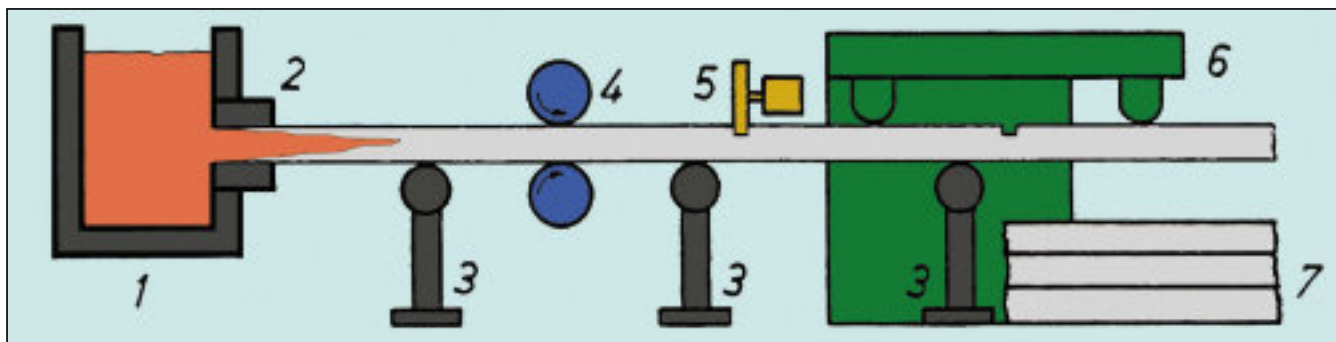


Fig. 1 : Schéma de machine de coulée continue horizontale.

1 : creuset - 2 : filière en graphite - 3 : rouleaux de soutien - 4 : cylindres d'entraînement - 5 : tronçonnage - 6 : cassage - 7 : barres.

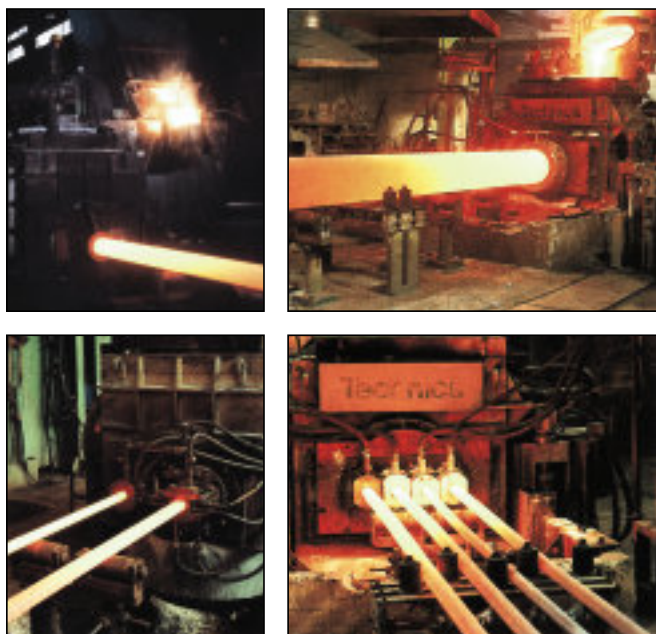


Fig. 2 : Différentes installations de coulée continue :

- Installation de coulée continue pour une barre avec remplissage du creuset en arrière plan (source : Contifonte, Kuhn / Saverne (F)),
- Installation de coulée continue pour une barre (source : Tasso, Odense (DK)),
- Installation de coulée continue pour deux barres (source : Contifonte, Kuhn / Saverne (F)),
- Installation de coulée continue pour quatre barres (source : Tasso, Odense (DK)).

renouvelé toutes les 15 à 30 minutes. La température de la fonte liquide dans le creuset varie entre 1 180 et 1 300 °C en fonction du module des barres à produire. En raison des lois de refroidissement, la température de surchauffe est d'autant plus élevée que la barre à couler est mince.

Au cours de la première phase de refroidissement de la fonte à travers la filière (refroidissement primaire), une couche externe solide se forme. Celle-ci assure la tenue de l'ensemble pendant la suite de la solidification qui se poursuit en dehors de la filière à l'air libre. La solidification (refroidissement secondaire) se poursuit dans tout le jet pendant l'extraction. Le centre de la barre se solidifie en dehors de la filière. Cette dernière, principalement constituée de graphite électrostatique, a plusieurs rôles : elle donne au jet sa forme, son action lubrifiante réduit les frottements entre la filière et les jets et enfin, grâce à ses propriétés physiques et thermiques, elle ajuste la vitesse de refroidissement de la barre au niveau souhaité. Le débit d'eau dans la coquille est réglable pour modifier l'intensité du refroidissement. La hauteur métalostatique de la fonte liquide dans le creuset a un effet de masselottage sur la barre. Le retrait à l'état liquide des jets est compensé par l'alimentation continue en métal liquide. En parallèle, la précipitation du graphite au cours de la solidification empêche la formation de retassures. La maîtrise de tous ces paramètres permet l'obtention de jets coulés en continu avec une structure particulièrement dense et homogène exempte de retassures et de porosités. Avant de procéder au remplissage du creuset, la filière est fermée sur le côté par un tirant d'extraction. Celui-ci est extrait au moyen d'un moteur à commande électronique qui, dans le cas de filières fixes, tire sur la barre en discontinu. Le cycle d'extraction comporte une phase d'avance et une phase de repos (temps d'attente) ; la maîtrise de ce cycle est primordiale pour la production de jets en coulée continue de la fonte. La longueur de l'avance peut varier entre 30 et 80 mm selon la taille de la barre et la nuance de la fonte. L'installation est équipée en aval d'un système de conditionnement sur chaque barre. Le profil en mouvement est partiellement

tronçonné à l'aide d'une scie ou d'un système de découpe au chalumeau qui se déplace parallèlement à la barre. Les jets sont ensuite cassés à l'aide d'un dispositif de cassage hydraulique.

La figure 2 illustre le fonctionnement des installations de coulée continue avec le creuset de maintien, la filière et l'extraction d'une, de deux et de quatre barres. Le client ou le revendeur peut exiger très rapidement du producteur un nombre important de différents jets. C'est la raison pour laquelle la fonte coulée en continu doit souvent être disponible dans des temps très courts. Les fonderies doivent avoir un stock permanent pour assurer les livraisons des nombreuses nuances et diverses dimensions de profils (figure 3). Les jets peuvent être de section ronde, carrée ou rectangulaire, de différentes tailles et longueurs.



Fig. 3 : Stock de jets coulés en continu, de formes, de tailles et de longueurs variées (source : K. Vollrath, Rees).

La figure 4 représente deux variantes du procédé de fabrication de jets coulés en continu. La variante 1 est le cas le plus fréquent : la fonderie livre au client pour usinage les profils aux dimensions et aux caractéristiques mécaniques demandées. Dans ce cas, aucun traitement d'amélioration des caractéristiques n'est utile.



Fig. 4 : Les différentes étapes de fabrication des pièces en fonte coulées en continu.

La figure 5 illustre à gauche les différentes étapes de fabrication de la variante 1. Un traitement thermique peut être nécessaire dans certains cas. Un contrôle qualité global doit être pratiqué en fin de

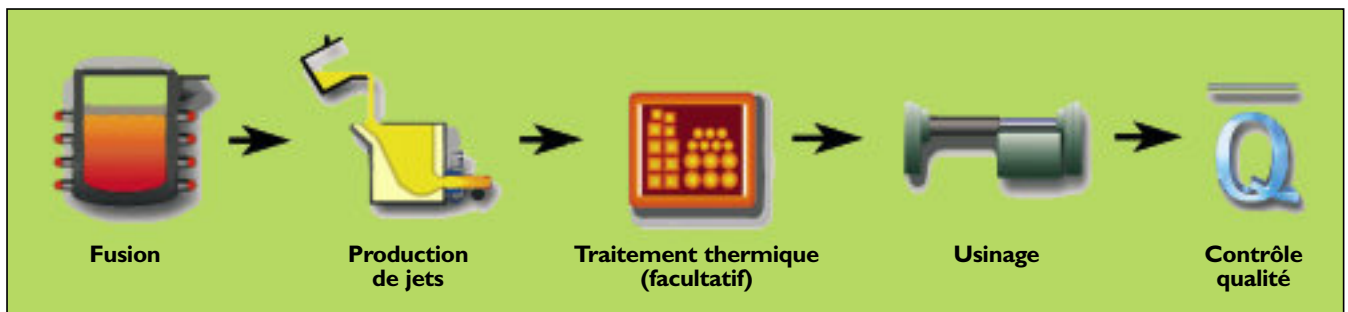


Fig. 5 : Les étapes de fabrication de coulée en continu de la fonte (source : Gontermann-Peipers, Siegen (D)).

Tableau I : Sélection de méthodes de contrôle pour les pièces en fonte coulées en continu.

Méthode de contrôle	Etat	Nuance		Norme	
		GJL	GJS		
Examen visuel	brut	x	x	DIN EN 1559-1, 1559-3	
	usiné	x	x	DIN EN 1559-1, 1559-3	
Contrôle Dimensionnel	brut	x	x	DIN ISO 8062	
	usiné	x	x		
Essai de dureté	brut	x	x	EN 10003-1	DIN EN 1561, 1563, 13835
	usiné	x	x	EN 10003-1	DIN EN 1561, 1563, 13835
Examen structural	brut	x	x	EN ISO 945	
	usiné	x	x	EN ISO 945	
Analyse chimique	brut	x	x		
	usiné	x	x		
Essais mécaniques	brut	x	x	EN 10002-1, 10045-1	DIN EN 1561, 1563, 13835
	usiné	x	x	EN 10002-1, 10045-1	DIN EN 1561, 1563, 13835
Ressuage	brut	-	-	s'appuyant sur DIN-EN 571-1	s'appuyant sur DIN-EN 1371-1
	usiné	x	x	DIN-EN 571-1	DIN-EN 1371-1
Ultrasons	brut	-	-	s'appuyant sur DIN-EN 583	
	usiné	-	x	DIN-EN 583-1	DIN-EN 12680-3
Magnétoscopie	brut	-	-		
	usiné	x	x	DIN EN 1369	

fabrication. Durant tout le processus de fabrication, un suivi qualitatif doit être assuré. Par contre, pour la variante 2 (figure 4, droite), une amélioration des propriétés et caractéristiques utiles du matériau, visant plus particulièrement la résistance mécanique, est obtenue après pré-usinage par des traitements thermiques ciblés et par des revêtements ou traitements de surface.

Le tableau I précise les différentes méthodes de contrôle de la qualité pratiquées par les producteurs de fontes coulées en continu. Parmi ces méthodes figurent l'examen visuel, le contrôle dimensionnel, l'examen micrographique, l'analyse chimique, les propriétés mécaniques avec l'essai de traction, l'essai de dureté Brinell ainsi que les contrôles non destructifs : ressuage, ultrasons, magnétoscopie.

Les jets coulés en continu, de longueur définie, sont généralement livrés par le fabricant à l'état brut ou usiné. Le fabricant peut également proposer un usinage sur chaque face conformément à la demande du client (figures 6 et 7).

Ainsi le client fait l'économie de certaines opérations d'ébauche. Les jets carrés et rectangulaires peuvent être usinés sur six cotés. On applique dans ce cas des précisions angulaires < 0,05 mm à 100 mm, des valeurs identiques pour les tolérances parallélisme, planéité et de longueur < 0,04 mm à 100 mm. Il est également possible de livrer des pièces avec des points de départ pré-usinés et de précentrage.

Les jets ronds peuvent être usinés ou écroûtés [2].

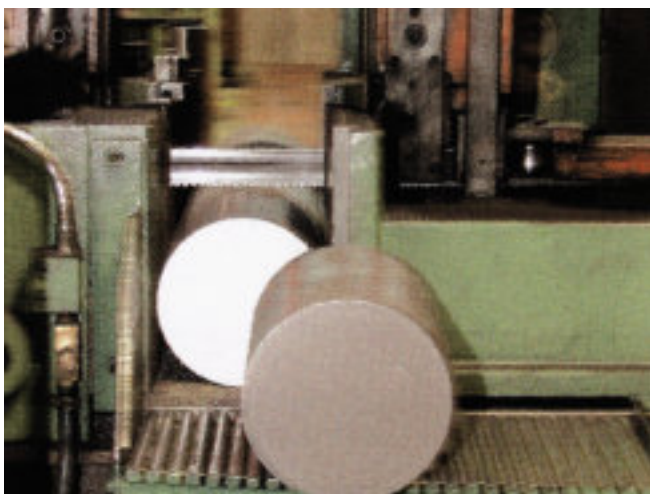


Fig. 6 : Sciage de barres coulées en continu : un service proposé au client (source : ACO Guss, Kaiserslautern (D)).

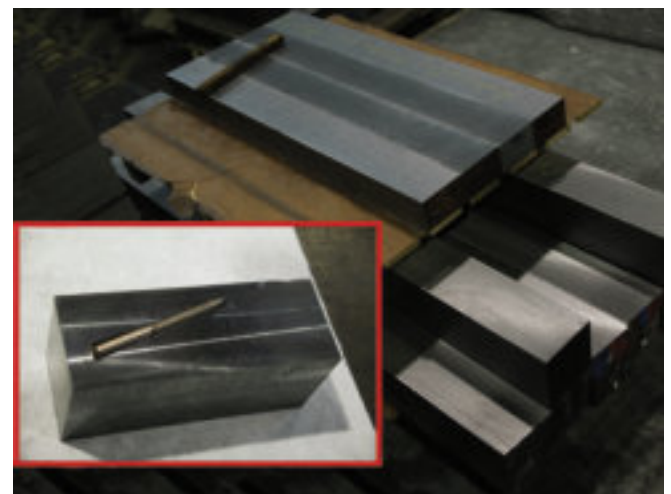


Fig. 7 : L'usinage de finition peut être réalisé directement sur les blocs ébauchés aux dimensions voulues (source : K. Vollrath, Rees).

Les nuances de fonte

Les matériaux coulés en continu regroupent plusieurs nuances de fonte. Parmi ces fontes, l'on distingue :

- la fonte à graphite lamellaire GJL (DIN EN 1561) [3],
- la fonte à graphite vermiculaire GJV (recommandation technique du VDG W50, mars 2002) [4],
- la fonte à graphite sphéroïdal GJS (norme DIN EN 1563) [5],
- la fonte GS bainitique (DIN EN 1564) connue dans le monde sous l'appellation de fonte ADI (Austempered Ductile Iron) [6, 7, 8], qui probablement sera désignée dans le futur par fonte à graphite sphéroïdal austéno-ferritique (ausferritique),
- la fonte malléable GJMB/GJMW (DIN EN 1562) [9],
- la fonte austénitique GJLA-X/GJSA-X (DIN EN 13835) [10, 11],
- la fonte résistant à l'usure GJN (DIN EN 12513) [12].

La littérature technique [3 à 13] décrit dans le détail la métallurgie des fontes, leurs propriétés, la normalisation et les domaines d'application.



Fig. 8 : Exemple intéressant et important de pièces coulées en continu : moules de verrerie (source : ACO Guss, Kaiserslautern (D)).

La fonte se distingue par les formes du graphite précipité, par sa structure spécifique après l'addition d'éléments d'alliage ou après traitement thermique, et dans le cas de la fonte malléable par la précipitation du graphite sous l'action d'un traitement thermique à partir d'une structure blanche.

Les paragraphes suivants traitent uniquement de la fonte à graphite lamellaire et de la fonte à graphite sphéroïdal.

Ces fontes sont des alliages fer-carbone-silicium dont la teneur en carbone est comprise entre 2 et 4 % et la teneur en silicium entre 2 et 3 %.

Si aucun autre élément d'alliage n'est ajouté, on parle de fontes non alliées bien que la teneur en silicium soit élevée.

La matrice métallique de ces fontes correspond à celle d'un acier eutectoïde avec une teneur en carbone proche de 0,7 % et une teneur en silicium comprise entre 2 et 3 %, dans laquelle le graphite est présent sous ses différentes formes.

Les transformations de phases et de structure qui se produisent pendant l'élaboration ou le traitement thermique doivent donc être décrites à l'aide des diagrammes d'équilibre pour systèmes ternaires (Fe-C-Si).

Ces diagrammes étant à quatre variables, leur représentation ne peut être que spatiale.

Si on considère constante une des variables, nous sommes ramenés à un diagramme à deux dimensions. Une section quasi binaire suffit à décrire les processus de transformation par les système Fe-C-Si à 2,4 % de silicium (figure 9).

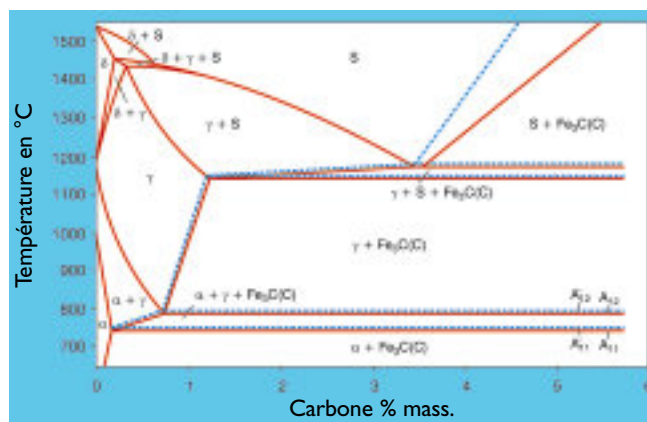


Fig. 9 : Diagramme Fe-C-Si (section quasi binaire à 2,4 % silicium) [13].

La structure du métal liquide par rapport à la transformation structurale du matériau à l'état solide montre deux étapes de transformation (étapes de graphitisation).

La première étape de graphitisation se situe entre la température du liquidus et la transformation eutectoïde. La distinction se fait lors de la solidification de la fonte par la formation ou non de graphite. Dans le premier cas on parle de solidification grise et dans le second cas, de solidification blanche.

La solidification blanche ou grise dépend de la composition chimique et de la vitesse de refroidissement au cours de la solidification. La deuxième étape de graphitisation se situe dans le domaine de la transformation eutectoïde.

Une matrice perlitique ou ferritique se forme suivant les conditions d'élaboration et de refroidissement. L'inoculation du métal liquide est également un facteur influent en faveur de la solidification grise. Les propriétés mécaniques de la fonte, à composition chimique donnée, dépendent de la vitesse de refroidissement. Dans la pratique, on constate que les propriétés mécaniques sont sensibles aux épaisseurs des parois des pièces moulées. Une faible épaisseur de paroi entraînera une vitesse de refroidissement élevée, et une épaisseur de paroi forte correspond à une faible vitesse de refroidissement. Cette sensibilité des propriétés mécaniques aux épaisseurs de paroi est plus forte pour les fontes à graphite lamellaire que pour les fontes à graphite sphéroïdal.

La dureté (principalement la dureté Brinell) des fontes est toujours une dureté mixte. Ces matériaux ont une matrice métallique dure, similaire à celle des aciers, dans laquelle se sont formés des cristaux de graphite de faible dureté. Seules les mesures de micro-dureté permettent de déterminer la dureté de la matrice métallique.

La densité des fontes est inférieure d'environ 10 % à celle des aciers de par la faible densité des cristaux de graphite qui se sont formés dans la matrice métallique similaire à celle d'aciers. Le volume de graphite dans la structure est d'environ 10 %. A géométrie égale, si on emploie une fonte à la place d'un acier, cette différence de densité entraîne un gain de poids et des constructions plus légères. L'usinabilité des fontes est meilleure que celle des aciers. Avec les fontes, les vitesses d'avance et de coupe sont plus élevées et la durée de vie des outils est augmentée. Le graphite présent dans la fonte améliore la fragmentation du copeau et a une action lubrifiante. La morphologie et la quantité du graphite ont peu d'influence sur l'usinabilité. Par contre la structure de la matrice métallique a une grande importance. Les nuances ferritiques ont une meilleure usinabilité que les nuances perlitiques.

Les fontes sont résistantes à l'usure. Elles ont une bonne résistance au glissement, à la compression ainsi qu'au frottement.



Fig. 10 : Un grand domaine de cotes dimensionnelles et les profils de jets coulés variés permettent la fabrication des pièces les plus diverses à des coûts d'usinage réduits (source : TASSO, Odense (DK)).

Elles sont particulièrement utilisées pour les organes de glissement dans les machines. Le graphite est un agent lubrifiant complémentaire. L'arrachement brutal du graphite lors de l'usinage de la surface libre des cavités dans lesquelles s'accumule le lubrifiant, ce qui favorise les conditions d'usinage. De bonnes propriétés de fonctionnement avec des contraintes de charges importantes sont ainsi obtenues. Les fontes perlitiques sont les plus résistantes à l'usure. La résistance à l'usure peut être fortement améliorée par un durcissement superficiel, un traitement thermochimique ou une transformation austénitique isotherme.

Les arguments en faveur d'une production écologique et durable gagnent du terrain. Les fontes sont élaborées à partir de ferrailles, de riblons d'acier et de fontes de première fusion. La part de la fonte de première fusion dont l'élaboration demande beaucoup d'énergie, se situait en Allemagne en 2003 à 8,7 % de la quantité totale utilisée dans la charge. De ce fait, 90 % de la charge métallique proviennent du circuit de recyclage. Nous pouvons conclure que les fontes coulées en continu sont des matériaux issus du recyclage. Sur ce point, les fontes sont pratiquement imbattables.

De plus, l'élaboration et les applications de la fonte respectent l'environnement. Un recyclage quasi total et sans résidus est possible. Le taux de recyclage est depuis des décennies très élevé et ne peut guère être amélioré. Les déchets issus de la production et des produits sont systématiquement réintroduits dans le circuit de production. La qualité des matériaux recyclés n'altère pas les caractéristiques finales des pièces. On note même une amélioration des caractéristiques. Par

exemple, on peut produire sans difficulté une fonte à graphite lamellaire avec une résistance mécanique de 200 ou 250 N/mm² à partir de ferrailles de fonte à graphite lamellaire et de ferrailles de recyclage ayant une résistance mécanique de 150 N/mm².

Les fontes à graphite lamellaire (GJL)

▶▶▶ La fonte à graphite lamellaire traditionnelle continue à être très demandée : sa production annuelle mondiale est supérieure à la production de tous les autres matériaux moulés. La somme des coûts (matériau, élaboration, exploitation, dépollution) fait de ce matériau un matériau économique. Il faut souligner ses bonnes propriétés mécaniques, physiques, technologiques et de coulée.

La fonte à graphite lamellaire est d'après la norme EN 1561 un alliage de fonderie fer-carbone dans lequel le carbone libre est du graphite qui se présente sous la forme principalement de lamelles (graphite lamellaire). Sa désignation normalisée est GJL (EN 1560). Pour les pièces coulées en moule sable, cette norme propose des nuances dont la résistance à la traction est comprise entre 100 et 350 N/mm² et la dureté Brinell entre 155 et 265.

Les lamelles de graphite forment dans une cellule eutectique un produit cohérent à partir des constituants ressemblant à des feuilles (figure 11). L'ordre des lamelles de graphite peut varier. Il dépend de la composition chimique de la fonte, des conditions de refroidissement et du nombre de germes présents dans le bain métallique apporté par l'inoculation. A une composition chimique donnée et dans le cas d'une inoculation adaptée au procédé, on observe la formation d'un graphite de type A selon la série de structures types définie par la norme EN ISO 945. Pour les fontes à graphite lamellaire, la quantité et le type de lamelles de graphite sont déterminantes pour les propriétés mécaniques. Le type de la matrice proche de l'acier est peu mis en valeur. Les lamelles de graphite fragilisent la matrice du matériau. En effet, les extrémités des lamelles de graphite provoquent un effet "d'entailles" entraînant alors des amorces de rupture. Cela explique la relative faiblesse des caractéristiques mécaniques et le faible allongement des fontes à graphite lamellaire.

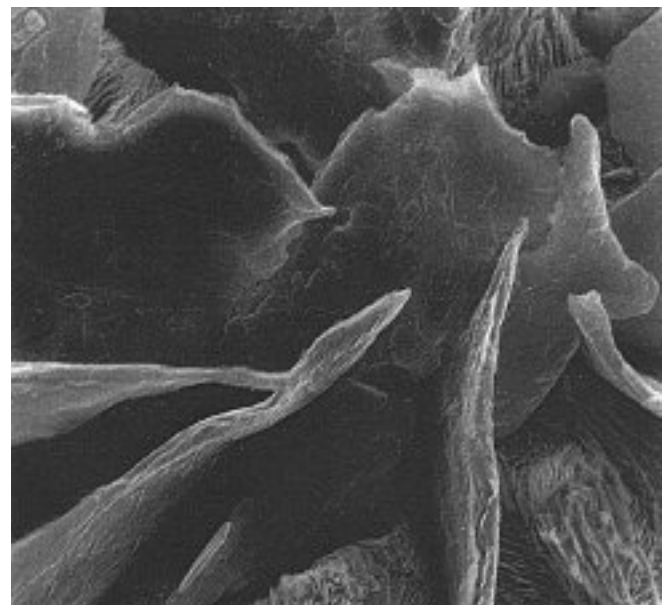


Fig. 11 : Représentation spatiale des lamelles de graphite [13].

Les propriétés mécaniques des fontes à graphite lamellaire dépendent nettement de la vitesse de refroidissement, autrement dit de l'épaisseur de paroi de la pièce moulée. Cette particularité dont il faut tenir compte lors du choix de l'alliage est décrite dans la norme EN 1561.

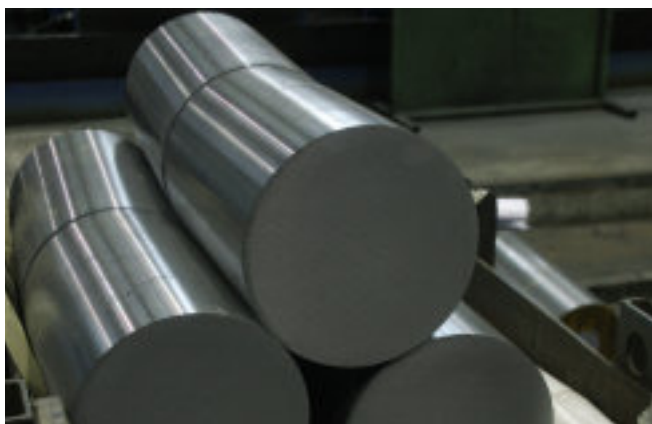


Fig. 12 : À partir de jets préusinés dans la fonderie, conformément aux désirs du client, les produits finaux peuvent être rapidement fabriqués et à un coût intéressant pour lui (source : K. Vollrath, Rees).

Les fontes à graphite lamellaire ont une bonne capacité à l'amortissement, elles réduisent et atténuent très rapidement les vibrations mécaniques venant de l'extérieur. Par rapport à l'acier, la vitesse de diminution des vibrations des fontes à graphite lamellaire est de l'ordre de 1 : 4,3.

Les propriétés des fontes à graphite lamellaire sont détaillées dans [3] avec des indications sur les propriétés mécaniques en sollicitations cycliques, sur les propriétés mécaniques à hautes et basses températures, sur le comportement à la rupture, ainsi que les propriétés physiques (densité, coefficient de dilatation thermique, conductibilité thermique, capacité thermique massique, force coercitive, pertes par hystérésis, résistance électrique spécifique) et sur les propriétés tribologiques (glissement et usure).

Les fontes à graphite sphéroïdal (GJS)

▶▶▶ On fabrique des pièces moulées industrielles en fonte à graphite sphéroïdal (FGS) depuis 60 ans. Par rapport à la fonte à graphite lamellaire, la fonte à graphite sphéroïdal est un matériau "jeune". C'est en 1937 au Giesserei-Institut du RWTH d'Aix-la-Chapelle que pour la première fois des sphéroïdes de graphite ont été observés dans la fonte. A peu près à la même période, le British Cast Iron Research Institute a réussi à élaborer de la fonte à graphite sphéroïdal en ajoutant au bain métallique du cérium. Mais ce n'est que lorsque l'International Nickel Inc. (USA) a produit de la fonte à graphite sphéroïdal en ajoutant un alliage-mère nickel-magnésium que la production industrielle de ce matériau a véritablement commencé. C'est le début triomphant de la fonte à graphite sphéroïdal avec des caractéristiques proches de l'acier. Pour des raisons économiques, de nombreuses pièces en acier ont été remplacées avec succès par des pièces en fonte à graphite sphéroïdal. Ce processus de substitution se poursuit. La fonte à graphite sphéroïdal est d'après les normes EN 1561 et EN 1564 un alliage fer-carbone, dans lequel le carbone libre se

présente principalement sous la forme de sphéroïdes (graphite sphéroïdal) correspondant aux formes V et VI selon la norme EN ISO 945 (figure 13). Leur désignation est GJS (EN 1569). Pour les pièces coulées en moule sable, les propriétés mécaniques données dans les normes européennes sont les suivantes :

- nuances normales : résistance à la traction comprise entre 350 et 900 N/mm², limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % entre 220 et 600 N/mm², allongement à la rupture : entre 2 et 22 %, dureté Brinell : entre 130 et 330,
- nuances à haute résistance : résistance à la traction : entre 800 et 1 400 N/mm², limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % entre 500 et 1 000 N/mm², allongement à la rupture : entre 1 et 8 %, dureté Brinell : entre 130 et 330.

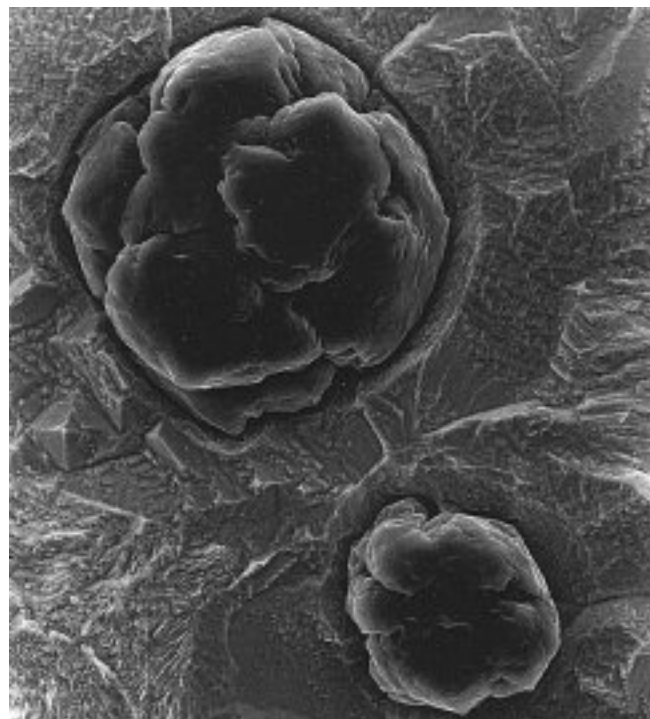


Fig. 13 : Représentation spatiale des sphéroïdes [13].

Les nuances les plus résistantes sont appelées d'après la norme EN 1564 "fontes bainitiques". Mais elles devraient prochainement s'appeler "fontes à graphite sphéroïdal austéno-ferritiques (ausferritiques)". La présence de sphéroïdes de graphite dans une matrice métallique identique à l'acier annule l'effet d'entaille des lamelles de graphite qui a été décrit. De ce fait les discontinuités de la matrice métallique sont limitées. Les propriétés de la matrice métallique sont parfaitement mises en valeur comme pour l'acier. Le rapport limite d'écoulement/résistance à la traction est plus favorable avec les fontes à graphite sphéroïdal qu'avec les aciers. Ce rapport est de 0,44-0,53 pour les aciers et de 0,6-0,7 pour les fontes à graphite sphéroïdal. Depuis plus de 60 ans, la fonte à graphite sphéroïdal est employée à la place de l'acier (acier moulé, forgé, laminé) pour des raisons économiques, et cette tendance se poursuit.

Les aciers (à résistance mécanique élevée comparable) offrent après rupture un meilleur allongement que les fontes à graphite sphéroïdal. Cependant, comme démontré dans de nombreux cas, ce n'est pas un inconvénient pour ce type de fonte, pour preuve, l'exemple du vilebrequin automobile. Dans les années soixante, on a commencé à remplacer les vilebrequins en acier forgé par des vilebrequins en fonte à graphite sphéroïdal. A résistance de traction et à limite élastique égales, l'allongement après rupture des nuances de fonte utilisées est plus faible que celui des aciers (3 % au lieu de 20 %). Aujourd'hui, plus de 90 % des voitures et des véhicules utilitaires sont équipés de vilebrequins en fonte à graphite sphéroïdal dont la tenue à la fatigue, par flexion et torsion, est tout à fait satisfaisante.

Tableau II : Les atouts de la fonte à graphite sphéroïdal par rapport à l'acier.

Les résistances mécaniques (résistance à la traction, limite d'allongement) sont largement équivalentes à celles de l'acier.
Le rapport limite apparente d'élasticité/résistance à la traction est meilleur pour les fontes que pour les aciers.
L'allongement à la rupture (coefficient de striction) est plus faible mais ce n'est pas un inconvénient.
La dureté est satisfaisante pour de nombreuses applications.
Les limites de fatigue sont largement équivalentes à celles de l'acier.
La densité est environ 10 % plus faible.
Le rapport résistance mécanique/poids est plus élevé.
La fonte permet la production de pièces légères.
La capacité d'amortissement des vibrations mécaniques est meilleure.
L'usinabilité est meilleure.
Les propriétés tribologiques sont satisfaisantes.
Un recyclage quasi total est possible.
La fonte est un matériau recyclé. Les pièces moulées en fonte sont des produits recyclables.
Il n'y a pas de perte de caractéristiques après recyclage.
Les coûts énergétiques de la fusion sont inférieurs.
La fonte n'est pas toxique.
Le remplacement de l'acier par la fonte permet de réaliser des économies.

L'allongement à la rupture décrit approximativement le comportement à la déformation (par exemple la forgeabilité), c'est donc davantage une propriété de fabrication que d'emploi. Les pièces moulées produites étant directement, après solidification et refroidissement proches des cotes finales, aucune opération de déformation n'est nécessaire. Environ 90 % des endommagements par rupture des organes des machines sont des ruptures par fatigue dues au matériau. La rupture par fatigue est toujours une rupture fragile comme pour les aciers avec un allongement élevé.

La limite de fatigue (résistance limite de fatigue aux efforts répétés) d'éprouvettes non entaillées est comprise entre 180 et 320 N/mm² pour les fontes à graphite sphéroïdal ainsi que pour les fontes bainitiques. Les fontes à graphite sphéroïdal sont moins sensibles à l'effet d'entaille que les aciers. En ce qui concerne la capacité à amortir les vibrations mécaniques, la fonte à graphite sphéroïdal se situe entre l'acier et les fontes à graphite lamellaire. Les avantages par rapport à l'acier sont résumés dans le tableau II. La référence [5] renseigne sur d'autres propriétés mécaniques statiques, la limite de fatigue, les propriétés à hautes et basses températures, l'usinage par enlèvement de copeaux, le soudage et le comportement à l'usure.

Jets en fonte coulés en continu

►►► Pour couler en continu des jets en fonte, certains points particuliers doivent être observés par rapport à la coulée en moule sable. C'est ce que nous allons détailler.

Propriétés mécaniques des pièces en fonte coulées en continu

►►► Les propriétés mécaniques des fontes à graphite lamellaire (GJL) et des fontes à graphite sphéroïdal (GJS) sont définies par les normes européennes (EN 1561, EN 1563 et EN 1564 pour les pièces coulées en moule sable) et ces fontes peuvent être achetées soit pour leur résistance à la traction ou leur dureté Brinell. Les procédés de fabrication de chaque nuance de fonte, leur composition chimique, traitement métallurgique et traitement thermique sont décidés par le fabricant dans la mesure où l'acheteur n'a pas d'exigences particulières. Le tableau III donne à titre d'information la composition chimique des fontes coulées en continu. Ces valeurs n'ont pas de caractère obligatoire, car, il n'y a aujourd'hui aucune norme nationale, européenne (EN) ou internationale (ISO) pour les jets en fonte coulés en continu. Les propriétés mécaniques des pièces en fonte coulées en continu sont indiquées par les fonderies dans leurs fiches produits ou techniques. La matrice métallique peut être ferritique, ferrito-perlitique ou perlitique (figure 14).

Tableau III : Composition chimique des fontes coulées en continu donnée à titre indicatif.

Élément chimique	Fonte à graphite lamellaire GJL [%]	Fonte à graphite sphéroïdal GJS [%]
C	2,80-3,70	3,00-3,85
Si	2,25-3,99	2,00-3,00
Mn	0,40-1,00	0,10-0,80
P	0,08-0,25	< 0,04
S	> 0,03	< 0,01
Cr	0,05-0,50	< 0,01
Cu	0,05-0,60	0,05-1,20
Ni	0,05-0,80	0,05-1,00
Mg		0,025-0,080

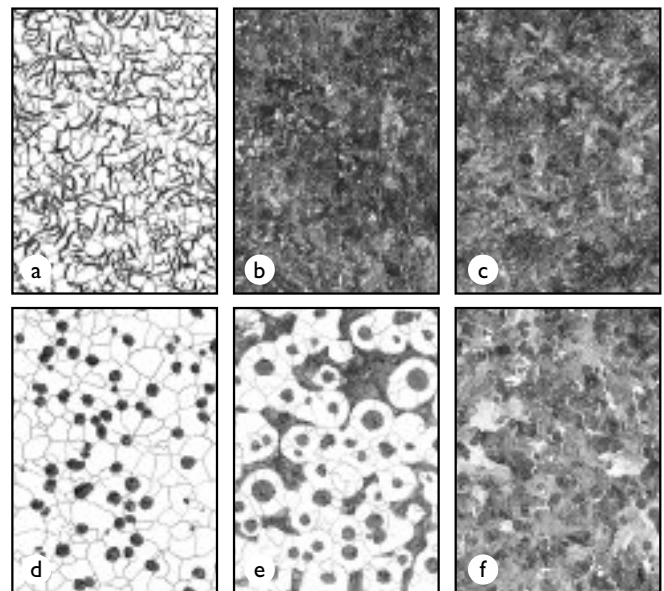


Fig. 14 : Microstructure des alliages coulés en continu.

(Source : Gontermann-Peipers, Siegen (D)).

- a) GJL-150C b) GJL-250C c) GJL-300C
d) GJS-400-15C e) GJS-500-7C f) GJS-600-3C

Les normes relatives aux fontes à graphite lamellaire et à graphite sphéroïdal contiennent plusieurs éléments que l'on retrouve également dans les normes européennes (EN 1561, EN 1563, et EN 1564). Pour décrire les propriétés mécaniques des pièces en fonte coulées en continu (différentes de celles des fontes coulées en moule sable du fait du procédé), nous avons repris des éléments des normes européennes pour les fontes coulées en moule sable que nous avons adaptés aux particularités du procédé de coulée continue :

- les fontes coulées en continu sont désignées selon la norme EN 1560,

- pour les fontes à graphite sphéroïdal, la formation du graphite doit correspondre aux formes V et VI selon la norme EN ISO 945,
- le procédé d'élaboration des fontes à graphite lamellaire et des fontes à graphite sphéroïdal, leur traitement métallurgique, leur composition chimique et leur traitement thermique sont décidés par le fabricant. Le tableau IV donne les compositions chimiques des fontes à graphite lamellaire et des fontes à graphite sphéroïdal, qui certes ne sont pas normalisées mais obligatoires,
- les nuances de fonte peuvent être caractérisées aussi bien par leur résistance à la traction que par leur dureté,
- les propriétés mécaniques sont classées en fonction de l'épaisseur de paroi qui est déterminante. Cette épaisseur de paroi est le double du module (rapport volume/surface). Pour simplifier, les propriétés mécaniques des fontes coulées en continu sont données également en fonction du diamètre des jets ronds.

Pour le prélèvement d'échantillons, on a généralement trois variantes :

- des éprouvettes coulées séparément (désignées par la lettre S),
- des éprouvettes coulées attenantes (désignées par la lettre U),
- des éprouvettes prélevées dans la pièce moulée (désignées par la lettre C).

Ces désignations sont données dans la norme EN 1560. Dans la pratique, les éprouvettes coulées séparément ne sont pas utilisées pour les pièces en fonte coulées en continu. Les éprouvettes coulées attenantes ne sont pas possibles du fait de ce procédé de coulée. Pour les pièces en fonte coulées en continu, les éprouvettes sont donc prélevées dans la barre et donc pour les propriétés mécaniques, ce sont les valeurs escomptées dans la pièce coulée (jet) qui servent de base.

- Les éléments annoncés dans les normes EN 1561, EN 1563 et EN 1564 sont valables pour les essais de traction, de dureté et les contre-essais. Afin de donner des valeurs réelles de propriétés mécaniques pour les jets en fonte coulés en continu, des analyses statistiques complètes ont été réalisées par les quatre sociétés participantes (voir annexe). Les valeurs escomptées évoquées ont pu être inscrites dans le résultat de cette analyse statistique en tant que valeurs minimales de la résistance à la traction ou selon le cas de la dureté Brinell.

Les tableaux IV à VII donnent les propriétés mécaniques des jets en fonte coulés en continu. Pour les fontes à graphite lamellaire, quatre nuances de fonte sont proposées dont la résistance à la traction est comprise entre 80 et 220 N/mm². La dureté Brinell est comprise entre 110 et 290. Pour les fontes à graphite sphéroïdal, la résistance à la traction des quatre nuances de fonte proposées est comprise entre 370 et 600 N/mm². La résistance à la traction, la limite conventionnelle

d'élasticité, l'allongement à la rupture et la dureté dépendent du diamètre de la barre (jet) ou bien encore de l'épaisseur de paroi qui est déterminante. Cette dépendance des propriétés mécaniques vis-à-vis de l'épaisseur de paroi est nettement plus marquée pour les fontes à graphite lamellaire que pour les fontes à graphite sphéroïdal.

Tableau IV : Résistance à la traction (= propriété caractéristique) de pièces en fonte GJL coulées en continu.

Diamètre de la barre [mm]	Épaisseur de paroi déterminante [mm]	Résistance à la traction à titre indicatif mini [N/mm ²]
GJL-150C, ferritique, après recuit		
30 - > 40	15 - > 20	110
40 - > 160	20 - > 80	95
160 - > 300	80 - > 150	80
GJL-200C, principalement ferritique		
30 - > 40	15 - > 20	155
40 - > 160	20 - > 80	130
160 - > 300	80 - > 150	115
GJL-250C, ferrito-perlitique		
30 - > 40	15 - > 20	195
40 - > 160	20 - > 80	170
160 - > 300	80 - > 150	155
GJL-300C, principalement perlitique		
30 - > 40	15 - > 20	220
40 - > 160	20 - > 80	200
160 - > 300	80 - > 100	185

C désigne une éprouvette prélevée dans la pièce (Norme DIN EN 1560).

Tableau VI : Dureté (= propriété caractéristique) de pièces en fonte GJL coulées en continu.

Diamètre de la barre [mm]	Épaisseur de paroi déterminante [mm]	Dureté Brinell
GJL-HB145C, ferritique, après recuit		
30 - > 40	15 - > 20	
40 - > 160	20 - > 80	110-180
160 - > 300	80 - > 150	
GJL-HB175C, principalement ferritique		
30 - > 40	15 - > 20	
40 - > 160	20 - > 80	140-210
160 - > 300	80 - > 150	
GJL-HB205C, ferrito-perlitique		
30 - > 40	15 - > 20	
40 - > 160	20 - > 80	170-240
160 - > 300	80 - > 150	
GJL-HB255C, principalement perlitique		
30 - > 40	15 - > 20	
40 - > 160	20 - > 80	220-290
160 - > 300	80 - > 150	

C désigne une éprouvette prélevée dans la pièce (Norme DIN EN 1560).

Tableau V : Résistance à la traction (= propriété caractéristique) de pièces en fonte GJS coulées en continu.

Diamètre de la barre [mm]	Épaisseur de paroi déterminante [mm]	Résistance à la traction mini [N/mm ²]	Limite d'allongement mini [N/mm ²]	Allongement à la rupture mini [%]
GJS-400-15C, ferritique, après recuit				
30 - > 60	15 - > 30	400	250	18
60 - > 200	30 - > 100	390	250	15
200 - > 370	100 - > 200	370	240	12
GJS-400-7C, ferrito-perlitique ¹				
30 - > 60	15 - > 30	400	250	7
60 - > 200	30 - > 100	390	250	7
200 - > 400	100 - > 200	370	240	11
GJS-500-7C, ferrito-perlitique				
30 - > 60	15 - > 30	500	320	7
60 - > 200	30 - > 100	450	300	7
200 - > 400	100 - > 200	420	290	5
GJS-600-3C, principalement perlitique				
30 - > 60	15 - > 30	600	360	3
60 - > 200	30 - > 100	550	340	1
200 - > 400	100 - > 200	550	340	1

¹ Cette nuance contient d'infimes traces de carbures libres pouvant être éliminées par un traitement thermique.

C désigne une éprouvette prélevée dans la pièce (Norme DIN EN 1560).

Tableau VII : Dureté (= propriété caractéristique) de pièces en fonte GJS coulées en continu.

Diamètre de la barre [mm]	Épaisseur de paroi déterminante [mm]	Dureté Brinell
GJS-HB155C, ferritique, après recuit		
30 - > 60	15 - > 30	130-180
60 - > 200	30 - > 100	
200 - > 370	100 - > 200	
GJS-HB160C, ferrito-perlitique		
30 - > 60	15 - > 30	130-190
60 - > 200	30 - > 100	
200 - > 400	100 - > 200	
GJS-HB205C, perlito-ferritique		
30 - > 60	15 - > 30	170-240
60 - > 200	30 - > 100	
200 - > 400	100 - > 200	
GJS-HB245C, principalement perlitique		
30 - > 60	15 - > 30	200-290
60 - > 200	30 - > 100	
200 - > 400	100 - > 200	

C désigne une éprouvette prélevée dans la pièce (Norme DIN EN 1560).

Le tableau VIII met en opposition, pour les nuances de fonte GJL et GJS citées, les fontes qui ont été coulées en continu jusqu'ici par les quatre sociétés participantes avec les désignations matériaux adaptées à la normalisation européenne (désignations de la société, marque commerciale). Le client a ainsi un repère, les désignations du marché ne sont pas écartées, et les droits des fabricants sont respectés. La figure 15 montre clairement où se positionnent les éprouvettes prélevées dans une barre de section circulaire, carrée et rectangulaire.

Tableau VIII : Liste des nuances de fonte coulées en continu avec le nom des fabricants.

Fonte à graphite lamellaire			
GJL-150C	ACO Eurobar® GG-P	CONFONTE® CF 15	TASSO GG-P-Schwarz
GJL-200C		CONFONTE® CF 20	TASSO GG-PPP-Grün
GJL-250C	ACO Eurobar® GG-PP	CONFONTE® CF 25	TASSO GG-PP-Rot
GJL-300C	ACO Eurobar® GG-P	CONFONTE® CFP	TASSO GG-P-Gelb
Fonte à graphite sphéroïdal			
GJS-400-15C	ACO Eurobar® GGG-40	CONFONTE® CFS 40	TASSO GJS-400-15
GJS-400-7C	ACO Eurobar® GGG-40/50		
GJS-500-7C	ACO Eurobar® GGG-50	CONFONTE® CFS 50	TASSO GJS-500-7
GJS-600-3C	ACO Eurobar® GGG-60	CONFONTE® CFS 60	TASSO GJS-600-3

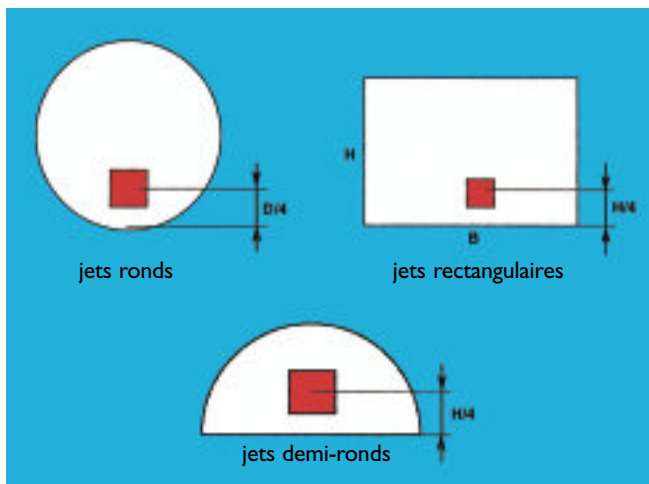


Fig. 15 : Emplacement des éprouvettes prélevées dans une barre en fonte coulée en continu.

En ce qui concerne les fontes à graphite lamellaire, la peau (ou zone de bord) présente des particularités liées au procédé. Sous l'influence de la filière refroidie à l'eau, la vitesse de refroidissement au cours de la solidification de la peau augmente fortement. Il se forme une fonte à graphite lamellaire avec un graphite de type D et partiellement de type E selon la norme EN ISO 945. Ce graphite finement ramifié et interdendritique est à l'origine d'une matrice ferritique (figure 16).

L'épaisseur de la peau en présence de graphite de types D et E dépend du diamètre de la barre ; pour un diamètre compris entre 25 et 50 mm, la surface de la peau occupe plus de 25 % de la section totale, au-dessus de 50 - 200 mm, elle occupe environ 15 % de la section totale et au-dessus de 200 - 350 mm, environ 10 %. Ces données sur l'épaisseur de cette zone de bord ne sont pas obligatoires, elles sont données à titre indicatif.

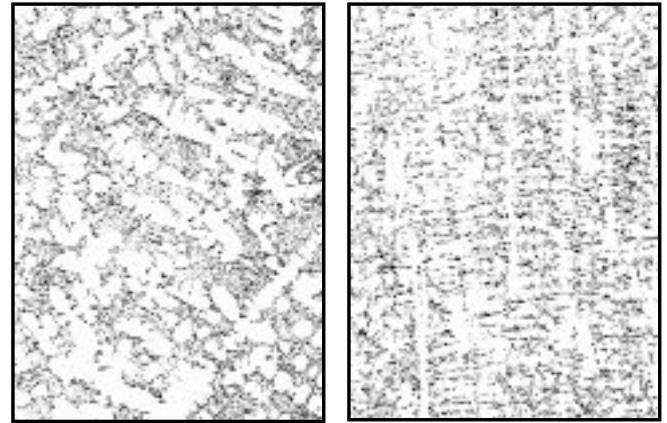
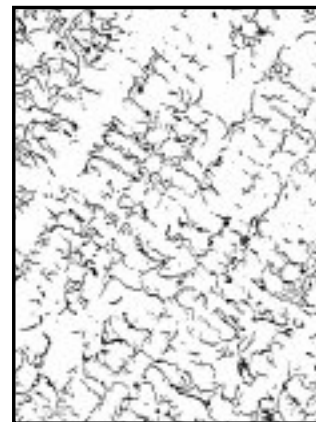


Fig. 16 : Microstructure de fontes GJL dans la zone de bord. (Source : Gontermann-Peipers, Siegen).

- a) graphite de type D, à l'extérieur,
- b) passage à un graphite de type E,
- c) graphite de type E au cœur.



En ce qui concerne les fontes à graphite sphéroïdal, cette vitesse de refroidissement élevée dans la zone de bord conduit à une forte augmentation du nombre de sphéroïdes par comparaison avec celui au centre de la barre (figure 17). Y.S. Lerner [14] donne pour une barre circulaire fabriquée comme une barre coulée en continu de 110 mm de diamètre en fonte à graphite sphéroïdal la répartition du nombre de sphéroïdes en fonction de la distance par rapport à la surface (figure 18). Le nombre de sphéroïdes atteint 450/mm² en surface et diminue vers le milieu de la barre. A environ 30 mm de la surface, il atteint 115/mm² et reste constant jusqu'au milieu de la barre.

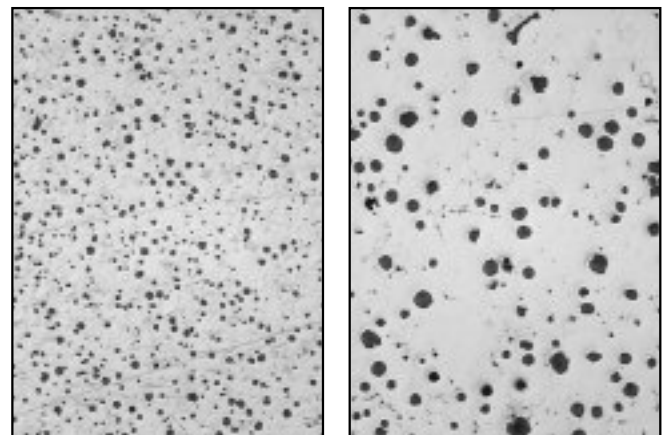


Fig. 17 : Nombre de sphéroïdes dans des fontes GJS coulées en continu (Source : ACOguss, Kaiserslautern (D)).

- a) dans la zone de bord (peau)
- b) au centre.

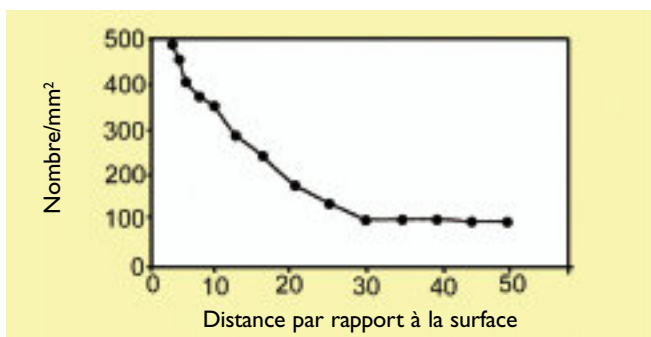


Fig. 18 : Evolution du nombre de sphéroïdes dans une fonte GJS en fonction de la distance par rapport à la surface [14].

Surépaisseurs d'usinage, flèche

En ce qui concerne la fabrication de pièces moulées en sable, les tolérances générales et les surépaisseurs d'usinage sont normalisées en fonction des dimensions pour les fontes à graphite lamellaire et les fontes à graphite sphéroïdal (comparer DIN 1685-1 et DIN ISO 8062).

Les sociétés qui ont participé à ce groupe de travail ont proposé pour les surépaisseurs d'usinage et pour la rectitude (flèche) des sections les valeurs données dans les tableaux IX et X en fonction des dimensions des jets pour les fontes à graphite lamellaire et sphéroïdal. Les figures 19 et 20 renseignent sur ces surépaisseurs et cette rectitude (flèche).

Tableau IX : Surépaisseurs d'usinage pour des pièces en fonte coulées en continu.

Profil	Dimensions du jet [mm]	Surépaisseurs d'usinage z [mm]	
		Fonte à graphite lamellaire GJL	Fonte à graphite sphéroïdal GJS
Jet rond	30-100	8	10
	> 100 - 200	12	14
	> 200 - 440	16	18
Jet carré	40-60	8	10
	> 60 - 150	10	12
	> 150 - 200	12	16
	> 200 - 300	16	18

Tableau X : Flèche (écart par rapport aux droites) des pièces en fonte coulées en continu.

Dimensions [mm]	Ecart par rapport aux droites [mm/1 000 mm]		
	Fonte à graphite lamellaire GJL		Fonte à graphite sphéroïdal GJS
	Sans recuit	Avec recuit	
30-100	4	6	6
>100-200	3	5	5
>200-440	3	4	4

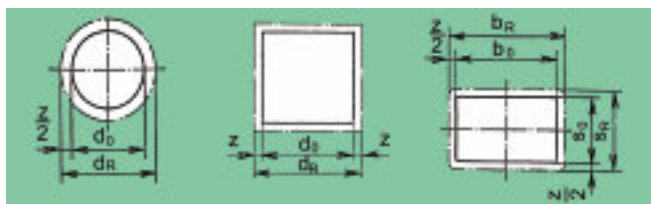


Fig. 19 : Surépaisseurs d'usinage pour des pièces en fonte coulées en continu.

Légendes : figure de gauche :

d_0 - le plus grand diamètre de la pièce usinée

z - surépaisseurs d'usinage.

d_R - diamètre théorique de la pièce brute $d_R = d_0 + z$

figure du milieu :

a_0 - la plus grande longueur d'arête de la pièce usinée.

z - surépaisseurs d'usinage.

a_R - longueur d'arête théorique de la pièce brute $a_R = a_0 + 2z$

figure de droite :

b_0, s_0 - la plus grande largeur ou épaisseur de la pièce usinée.

z - surépaisseurs d'usinage.

b_R, s_R - largeur ou épaisseur théorique de la pièce brute $b_R = b_0 + z, s_R = s_0 + z$

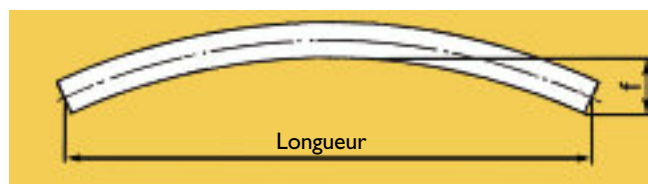


Fig. 20 : Flèche des pièces en fonte coulées en continu.

Traitement thermique des fontes

Le traitement thermique des alliages métalliques peut comprendre :

- un traitement thermique,
- un traitement thermochimique,
- un traitement thermomécanique.

Les traitements thermiques et thermochimiques peuvent fortement améliorer les propriétés des fontes. Les traitements thermomécaniques ne sont pas importants pour les fontes car, à l'exception des déformations superficielles, les déformations ne font pas partie des étapes de fabrication.

Les transformations structurales rendues possibles par un traitement thermique et les modifications des propriétés engendrées, sont plus importantes et plus variées pour les fontes que pour les aciers. Ainsi, par exemple, la teneur en silicium plus élevée de 2 - 3,5 % dans les nuances non alliées, fait évoluer la température eutectoïde du diagramme Fe-C vers celle du diagramme Fe-C-Si. Une source de carbone "interne" existe grâce au graphite qui entraîne une recarburisation de l'austénite jusqu'à saturation. Le silicium qui est présent ralentit, pendant la solidification, la formation de carbures de fer. De plus, on peut tirer profit des interactions qui se produisent entre les systèmes stable et métastable Fe-C-Si.

Traitement thermique

Les traitements thermiques peuvent fondamentalement modifier la microstructure et donc les propriétés. La figure 21 représente à l'aide d'un schéma les cycles température - temps des principaux traitements thermiques.

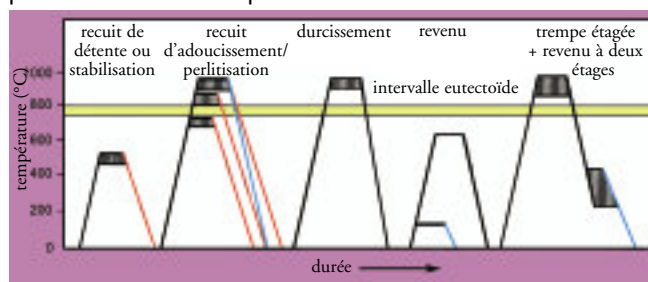


Fig. 21 : Les variantes du traitement thermique.

Légendes : Rouge = refroidissement dans le four, Bleu = refroidissement à l'air, Noir = trempe dans de l'huile.

Recuit de détente ou de stabilisation

Il est pratiquement impossible de fabriquer un produit moulé exempt de contraintes internes du fait des différentes vitesses de refroidissement à l'intérieur de la pièce. La hauteur et la direction de ces contraintes internes dépendent de la géométrie des pièces coulées, de leur tracé et des conditions opératoires à la coulée. Le recuit de détente ou stabilisation est un traitement thermique qui est utilisé pour supprimer les contraintes internes. Les températures de traitement sont comprises entre 500 et 550 °C et sont en-deçà du domaine de la transformation eutectoïde, ce qui évite une modification non souhaitée de la structure et une altération des propriétés mécaniques au cours du recuit.



Fig. 22 : Roues dentées et couronnes dentées en fonte : produits finaux en coulée continue typiques, qui se caractérisent par une dureté élevée et uniforme et une bonne usinabilité (source : Contifonte, Kuhn / Saverne (F)).

Pour éviter que de nouvelles contraintes n'apparaissent lors du recuit sous l'effet de l'échauffement et du refroidissement, il faut respecter les vitesses de chauffe (entre 10 et 50 °C/h) et les vitesses de refroidissement (entre 25 et 35 °C/h) jusqu'à au moins 300 °C. En ce qui concerne les pièces en fonte coulées en continu, un recuit de détente et stabilisation n'est pratiqué que dans certains cas.

Recuit d'adoucissement à haute température

Les pièces coulées en fonte grise, en général, ne doivent pas présenter de zone blanche afin de garantir leurs propriétés mécaniques et leurs caractéristiques. Dans le cas d'apparition de carbures eutectiques (lédéburitiques) ou de carbures primaires, il faut les éliminer en choisissant une température de recuit au-dessus de l'intervalle eutectoïde entre 900 et 950 °C. Le choix de la vitesse de refroidissement dépend donc du but visé, à savoir une structure perlitique ou une structure ferritique.

Recuit d'adoucissement ou ferritisation à basse température

Ce traitement thermique est utilisé pour transformer la perlite en ferrite. Au cours du recuit des aciers, seule la coalescence de la perlite lamellaire dans la perlite globulaire peut se produire. En revanche, le recuit des fontes conduit à une structure entièrement ferritique exempte de carbures de fer eutectoïdes. La température de recuit est en dessous de l'intervalle eutectoïde, à environ 700 °C. La vitesse de refroidissement est de 50 °C/h. Lors de la fabrication de jets en fonte GJL-150C et en fonte GJS-400-15C coulés en continu, le traitement thermique peut faire partie de la chaîne de fabrication de la fonderie.

Recuit d'adoucissement à deux étages

La ténacité des fontes à graphite sphéroïdal doit être très élevée, seul un traitement thermique à deux étages permet d'obtenir les propriétés souhaitées pour les nuances non alliées. Ce traitement consiste en une austénitisation à 850-920 °C, puis en un refroidissement dans un four ou à l'air et finalement en un maintien (5 - 10 h) dans l'intervalle eutectoïde entre 650 et 740 °C. La trempe à l'eau est suivie d'un revenu à 350 °C.

Recuit de perlitisation

Le recuit de perlitisation vise à développer une structure totalement ou partiellement perlitique, dans le but d'obtenir des propriétés mécaniques déterminées ou de contenir la structure dans des fourchettes d'épaisseur de paroi. À l'instar du traitement thermique des aciers, ce recuit est également appelé traitement de normalisation



Fig. 23 : La structure fine et compacte de la pièce coulée en continu convient idéalement à la fabrication des pièces hydrauliques étanches à la pression et aux gaz (source : Contifonte, Kuhn / Saverne (F)).

ou de perlitisation. Lors du recuit de perlitisation, la pièce est chauffée entre 900 et 920 °C, ce qui permet d'atteindre la région austénitique au-dessus de l'intervalle eutectoïde. Un refroidissement accéléré est ensuite appliqué pour contenir la formation de ferrite. La vitesse optimale de refroidissement à l'air ou à l'eau est ajustée en fonction de la taille de la pièce. Ce type de traitement thermique est également pratiqué en fonderie pour les jets en fonte coulés en continu.

Durcissement

La fonte étant un alliage fer-carbone-silicium, elle peut être durcie au même titre que l'acier. Le but du durcissement des fontes est d'obtenir soit une peau résistante à l'usure (durcissement superficiel) soit d'être une préparation au traitement de trempe et revenu. La dureté de la fonte atteint alors des valeurs élevées comprises entre 45 et 60 HRC et celle-ci devient très résistante à l'usure. Le durcissement consiste à chauffer la pièce au-dessus de l'intervalle eutectoïde entre 850 et 950 °C. Au cours de l'austénitisation, l'austénite se recarburise jusqu'à saturation. Les apports en carbone sont ici le carbure eutectoïde de la perlite et les cristaux de graphite. Le refroidissement rapide qui suit (trempe) empêche la formation de ferrite et de perlite et conduit à une transformation martensitique avec de l'austénite résiduelle. Les vitesses élevées de refroidissement exigées sont ajustées en trempant la pièce soit dans de l'huile, soit dans des émulsions ou dans de l'eau. Le durcissement de toute la pièce est la première étape du traitement de trempe et revenu. Grâce à certaines technologies, on peut réaliser un durcissement superficiel sur une faible profondeur de la pièce, pour augmenter la résistance à l'usure. La surface à traiter est chauffée soit par une flamme, soit par un courant inducteur ou un rayon laser à une température d'austénitisation, puis refroidie très rapidement. Un procédé spécial visant à améliorer la résistance à l'usure ou à la corrosion, est la fusion au laser. Dans ce procédé, la surface extérieure de la pièce est fondue par des rayons laser. Grâce à la conductivité thermique élevée du matériau, la solidification se produit à une vitesse de refroidissement élevée. Dans le cas des fontes, il se forme une peau à solidification blanche de dureté élevée. Cette technologie de fusion permet d'ajouter à la fusion d'autres éléments d'alliage, dans le but d'obtenir des propriétés spéciales dans la peau.

Trempe et revenu

La trempe et le revenu sont la combinaison d'un durcissement et d'un revenu (réchauffage). Le revenu permet d'optimiser les propriétés. En ce qui concerne les fontes à graphite sphéroïdal, la trempe et le revenu permettent d'obtenir les propriétés mécaniques voulues équivalentes à celles des aciers de traitement. Par contre l'allongement et la ténacité sont inférieures aux valeurs que l'on peut atteindre avec les aciers. Le revenu permet de supprimer la structure de trempe du durcissement (martensite et austénite résiduelle).

La température de revenu se situe entre 150 et 650 °C selon les caractéristiques visées. Lorsque l'on augmente la température du revenu, la résistance à la traction, la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % et la dureté diminuent, par contre l'allongement à la rupture et la résilience augmentent. Il faut réaliser plusieurs étapes de revenu jusqu'à des températures assez élevées pour obtenir une structure sans carbure en raison des teneurs importantes en silicium contrairement aux aciers. Lors d'un revenu à des températures plus élevées, du graphite se forme également dans une matrice ferritique.

Les fontes à graphite sphéroïdal sont souvent trempées et revenues pour augmenter leur résistance mécanique. Par contre, la plasticité et la ténacité n'atteignent pas d'excellentes valeurs.

Transformation bainitique isotherme

La transformation bainitique isotherme à des températures en-dessous de l'étage perlitique et au-dessus de l'étage martensitique, habituellement désignée sous l'appellation de trempe étagée, est appelée aujourd'hui transformation austénitique isotherme (DIN 17014). Pour les fontes, ce traitement thermique associé à une bainitisation complète n'a pas permis d'obtenir de très bonnes propriétés. Par contre, une variante particulière de ce traitement thermique associée à une transformation austénitique isotherme incomplète a conduit à une excellente combinaison des propriétés mécaniques. Au cours de la transformation austénitique isotherme, les pièces sont austénitisées entre 875 - 920 °C, puis rapidement trempées dans un bain de sels entre 300 et 400 °C.

La transformation austénitique commence avec la formation d'aiguilles de ferrite et l'austénite se sature en carbone, conduisant à une stabilisation de cette dernière. La formation de carbures ne se produisant pas, la transformation austénitique est stoppée. Il s'agit d'une transformation austénitique incomplète.

Après refroidissement à l'ambiante, la structure est constituée de ferrite aciculaire et d'austénite résiduelle (jusqu'à 40 %). La transformation austénitique isotherme a gagné en importance dans le cas des fontes à graphite sphéroïdal. Elle permet d'augmenter la résistance mécanique des pièces industrielles tout en améliorant l'allongement et la ténacité [6 à 8]. Elles peuvent ainsi se substituer aux aciers de traitement.

Traitements thermochimiques

Les traitements thermochimiques sont des traitements thermiques qui modifient volontairement la composition chimique d'un matériau par diffusion à l'intérieur et à l'extérieur d'un ou de plusieurs éléments. La nitruration, l'aluminisation, l'apport en silicium, la boruration, et la chromisation font partie de ces traitements thermochimiques, qui peuvent améliorer les propriétés non seulement des aciers mais également des fontes.

Nitruration

La nitruration est un traitement thermochimique utilisé pour saturer par diffusion la surface d'un acier ou d'une fonte en carbone en chauffant la pièce dans un milieu correspondant. La nitruration vise à augmenter la dureté, la résistance à l'usure, l'endurance et la résistance à la corrosion de la pièce par absorption de l'azote. La nitruration se déroule suivant le diagramme d'équilibre fer-azote. Si la nitruration est pratiquée en-dessous de la température eutectoïde, la solution solide α (ferrite) se sature alors en azote. Puis le nitruure Fe_4N (phase γ) se forme. Après saturation, d'autres phases se forment : le nitruure Fe_2N , appelé phase ϵ . Sous l'action assez longue de l'azote atomique à la surface des pièces en acier ou en fonte, il se

forme depuis le bord jusqu'au centre les couches suivantes : phase ϵ , phase γ , solution solide α . Si la pièce nitrurée est refroidie lentement à l'ambiante, la solubilité des phases ϵ et α à l'azote diminue et la phase γ est éliminée de ces couches.

Nitruration avec d'autres éléments d'alliage

Lors de la nitruration des alliages ferreux avec des éléments d'alliage, formant des nitruures particuliers, la formation d'une couche nitrurée est plus complexe. Les éléments d'alliage tels que le Cr, Al, Mo ou le V, qui ont une assez grande affinité avec l'azote, forment des nitruures particuliers très durs. Les fontes ayant une teneur en silicium toujours plus élevée, leur dureté est plus élevée, ce qui est dû à la présence d'aluminium dans le ferro-silicium employé. Dans une pièce nitrurée, on distingue la couche blanche de la couche de diffusion. La figure 24 renseigne sur le profil de dureté depuis la surface jusqu'au centre de la pièce nitrurée. A partir de ce profil qui montre la dureté à une distance donnée de la surface, la profondeur de trempe par nitruration est déterminée. La profondeur de trempe par nitruration est la distance perpendiculaire depuis la surface d'une pièce nitrurée jusqu'au point où la dureté correspond à une valeur limite définie conformément au but visé. La valeur au sens de cette norme est la valeur de dureté appelée dureté limite DL. La dureté limite se rapporte à l'état défini dans les documents techniques relatifs à la fabrication de pièces nitrurées. La dureté limite DL doit être définie comme la dureté Vickers HV : $DL = (\text{dureté à cœur réelle} + 50) \text{ HV}$ (arrondie à 10 HV). En tant que dureté à cœur, il faut mesurer la dureté $\text{HV}_{0,5}$ mesurée, à une distance de trois fois la profondeur de trempe. La dureté limite DL est normalement donnée comme la dureté Vickers $\text{HV}_{0,5}$.

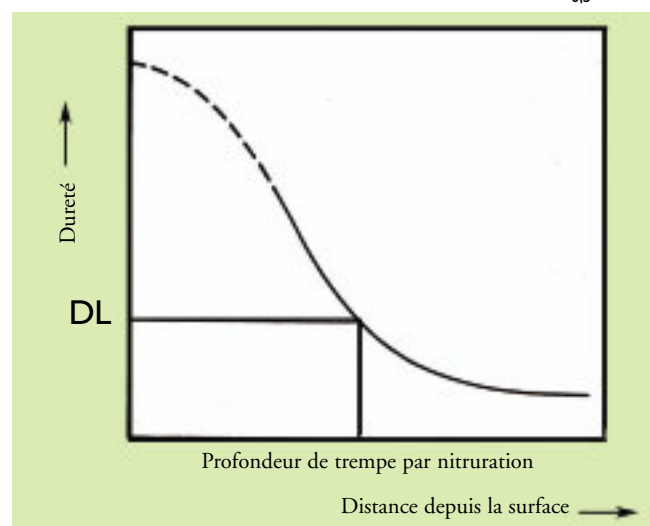


Fig. 24 : Courbe de nitruration (d'après la norme DIN 50190).

Le procédé de nitruration

La nitruration est réalisée dans des bains de sels ou en phase gazeuse. La nitruration en bains se produit dans des bains de cyanures et est en fait une carbonitruration par la carburation qui se produit en même temps. Les bains de sels utilisés sont constitués soit de cyanure de sodium soit de cyanure de calcium avec de faibles additions de chlorures. La nitruration en phase gazeuse est basée sur l'emploi d'ammoniac qui provoque une dissociation thermique lorsque les températures d'emploi sont comprises entre 500 et 560 °C. Ainsi l'azote atomique nécessaire reste à la surface de la pièce. Le degré de dissociation de l'ammoniac dépend de la pression et de la température dans le four de nitruration. La durée de la nitruration est relativement longue. Pour un acier de nitruration normale et pour une profondeur

de nitruration de 0,6 mm, elle dure par exemple 100 heures. Une réduction de cette durée est possible en employant des décharges lumineuses et en ajoutant des gaz oxydants (en particulier de l'oxygène pour l'ammoniac). Ici, c'est une fonte à graphite sphéroïdal qui a été nitrurée sous flux d'ammoniac. La figure 25 représente les courbes du profil de dureté correspondantes pour des fontes GJS-400-15C. A une température de nitruration de 510 °C et une durée de nitruration de 36 heures, la profondeur de trempé atteint 0,2 mm (courbe a) et à une température de nitruration de 580 °C et une durée de nitruration de 5 heures, la profondeur de trempé atteint 0,1 mm (courbe b).

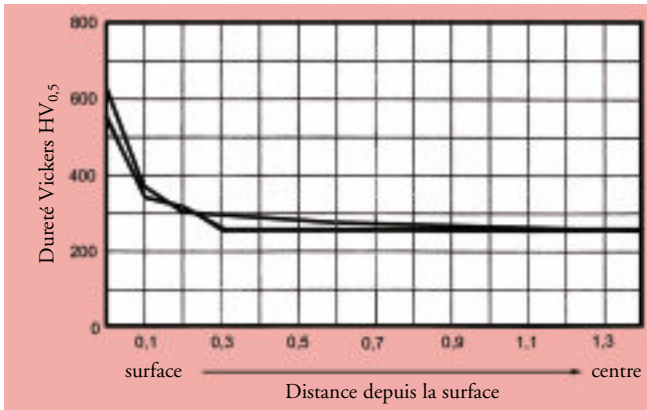


Fig. 25 : Courbes de nitruration pour des fontes GJS-400-15C. (source : Carl Gommann, Remscheid-Hasten).

Ces premières études montrent que les fontes à graphite sphéroïdal peuvent être aussi bien nitrurées que les aciers. Une couronne dentée en fonte à graphite sphéroïdal GJS-400-15V à été nitrurée en phase gazeuse (figure 26). Les caractéristiques de cette couronne sont les suivantes : module 3,5, 20 dents, diamètre primitif de 63 mm, dureté minimale sur les flans de la dent : 44 (profondeur de trempé par nitruration : 400 HV_{0,1}), diamètres interne et externe et les flancs meulés après nitruration. Les exigences de la nitruration de la couronne dentée ont pu être respectées au même titre qu'une couronne en acier.

Revêtements

L'application d'un revêtement signifie que l'on applique volontairement des couches utiles sur des surfaces pré-traitées sans modifier fortement la géométrie primaire de la pièce. L'application de matières non façonnées et fibreuses, l'application chimique ou électrolytique de couches font partie des revêtements. Les divers procédés visent à la protection des pièces contre la corrosion et l'usure, ils peuvent être utilisés également à des fins décoratives. Pour les fontes, les revêtements peuvent être également utilisés, sous plusieurs formes. Ici seuls la mise en peinture, l'émaillage, le chromage et le nickelage sont cités.

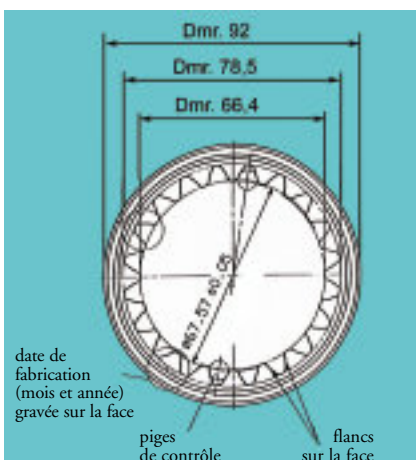


Fig. 26 : Couronne dentée. (Source : Bucher Maschinenbau, Klettgau (D)).

Déformations superficielles (laminage, galetage, grenailage)

Un traitement de précontrainte sur la surface d'une pièce réalisée au moyen de sphères (grenailage) ou de rouleaux peut augmenter les caractéristiques de surface d'une pièce par écrouissage et consolider la dureté superficielle d'une pièce. Des contraintes de compression apparaissent en surface des pièces. Une telle déformation superficielle a été réalisée avec succès sur des congés de raccordement de vilebrequins moulés en fonte à graphite sphéroïdal. Les contraintes internes de compression qui sont apparues ont augmenté sensiblement l'endurance.

Applications des pièces en fonte coulées en continu

Contrairement aux pièces en fonte moulée qui après fabrication sont proches des cotes finies avec une utilisation définie, les pièces (jets) en fonte coulées en continu sont des demi-produits destinés à des applications diverses. Les pièces en fonte coulées en continu offrent de multiples débouchés. De nombreuses applications industrielles peuvent être réalisées dans tous les secteurs d'activité. Les figures 8, 10, 12, 22, 23 et 27 montrent des exemples d'application. Elles mettent en évidence cette diversité d'utilisation.

CONCLUSION

Un groupe de travail ad-hoc du Deutschen Giessereiverband (DGV), Düsseldorf, a réalisé un état de l'art sur la fabrication de pièces en fonte coulées en continu en fonte à graphite sphéroïdal et à graphite lamellaire. Dans ce contexte, un premier travail a été présenté en vue d'une prochaine normalisation.

Nous remercions les sociétés qui ont participé à cette étude pour leur collaboration compétente et constructive, et tout particulièrement messieurs : Klaus REIF (animateur du groupe de travail ad-hoc (DK)), Marco ANTES et Wolfgang GIESE (ACO Guss (D)), Christophe ANCEL, Bernard LINDER, Hans SATTEL et Franck KOOTZ (Contifonte - Kuhn (F)), Klaus BEUTE (Gontermann-Peipers (D)), ainsi que Henrik ELMKVIST (Tasso (DK)).

Traduit de l'allemand par C. Colliard et révisé par C. Ancel (Contifonte S.A).

ANNEXE

Etude statistique des propriétés mécaniques

Les sociétés qui ont participé à ces travaux ont enregistré sur une période de production assez longue les propriétés mécaniques de leurs pièces en fonction du diamètre des barres ou selon le cas en fonction du module, et ont réalisé des analyses statistiques. Pour les fontes à graphite lamellaire, on a retenu la résistance à la traction et la dureté Brinell. Pour les fontes à graphite sphéroïdal, ce



Fig. 27 : Diverses pièces en fonte à graphite lamellaire et à graphite sphéroïdal qui montrent la diversité des pièces coulées en continu (source : ACO Guss, Kaiserslautern (D)).

sont la résistance à la traction, la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 %, l'allongement à la rupture et la dureté Brinell qui ont été retenus. Il apparaît clairement que pour les pièces en fonte coulées en continu, les propriétés mécaniques dépendent de l'épaisseur de paroi. Cette particularité est plus accentuée avec les fontes à graphite lamellaire qu'avec les fontes à graphite sphéroïdal. Les tableaux V à VIII rassemblent les données obtenues. Quelques exemples choisis de l'analyse statistique pour les fontes GJL-250C et GJS-400-15C sont

illustrés dans les figures 1 et 3, jusqu'à 5. La figure 2 illustre la relation entre la résistance à la traction et la dureté Brinell pour les fontes à graphite lamellaire. En prenant exemple sur les essais mécaniques réalisés pour les pièces moulées à graphite lamellaire (utilisation d'éprouvettes de 30 mm coulées séparément), il a été pris comme référence pour la coulée continue un jet de 30 mm de diamètre. Mais il est à souligner que les vraies valeurs de traction à prendre réellement en compte sont celles d'éprouvettes prélevées dans les jets.

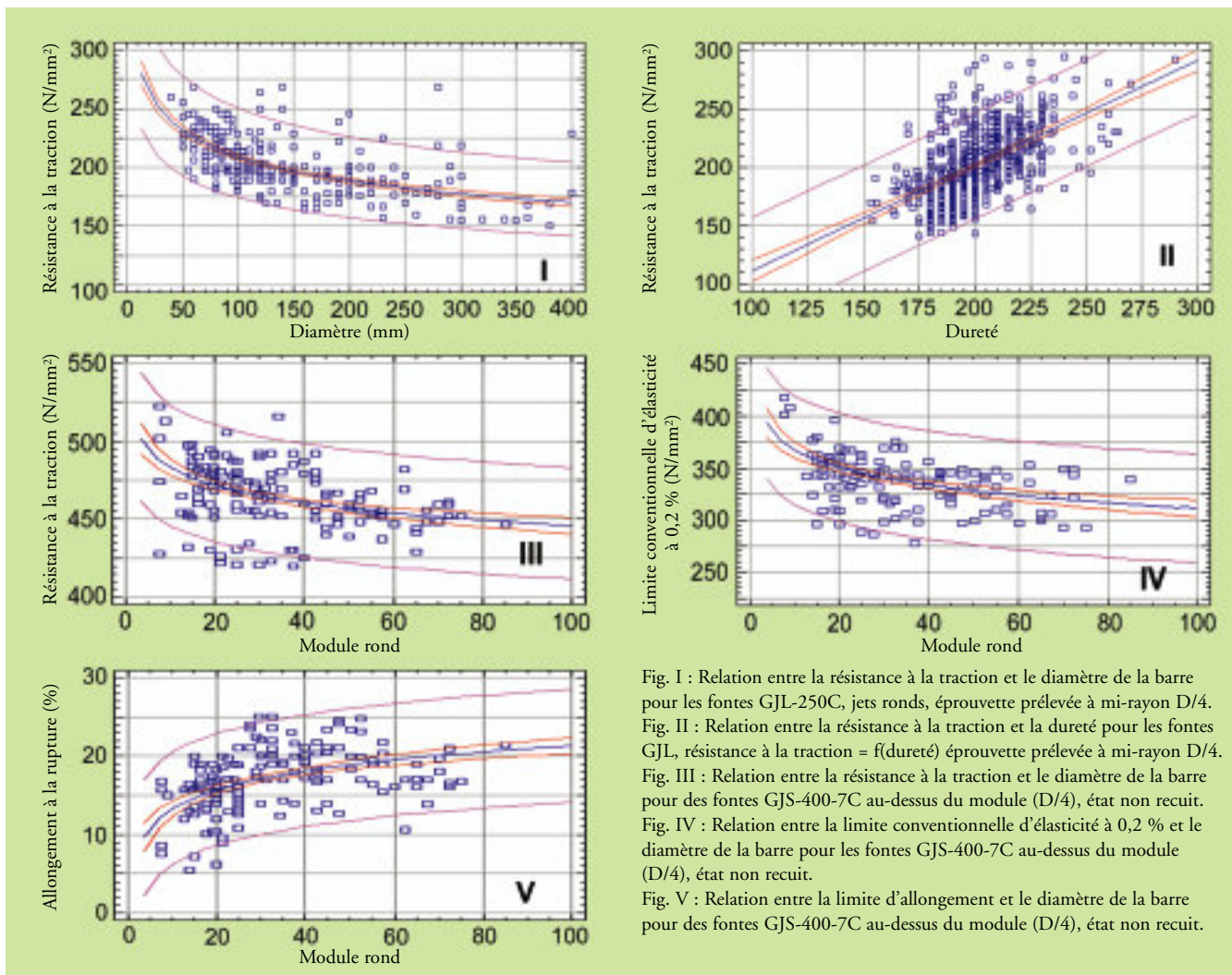


Fig. I : Relation entre la résistance à la traction et le diamètre de la barre pour les fontes GJL-250C, jets ronds, éprouvette prélevée à mi-rayon D/4.
 Fig. II : Relation entre la résistance à la traction et la dureté pour les fontes GJL, résistance à la traction = $f(\text{dureté})$ éprouvette prélevée à mi-rayon D/4.
 Fig. III : Relation entre la résistance à la traction et le diamètre de la barre pour des fontes GJS-400-7C au-dessus du module (D/4), état non recuit.
 Fig. IV : Relation entre la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % et le diamètre de la barre pour les fontes GJS-400-7C au-dessus du module (D/4), état non recuit.
 Fig. V : Relation entre la limite d'allongement et le diamètre de la barre pour des fontes GJS-400-7C au-dessus du module (D/4), état non recuit.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ACO Eurobar®, "Ein Qualitätsstrangguss aus Gusseisen", Konstruieren + Giessen, 29 (2004) N° 2, p. 41-42.
- [2] K. Vollrath, "Hydraulikguss - Zusatznutzen durch Dienstleistung nach Maß", Konstruieren + Giessen 29 (2004) N° 3, p. 25-26.
- [3] H. Werning et al., "Gusseisen mit Lamellengraphit", Konstruieren + Giessen, 25 (2000) N° 2, p. 1-82 (N° spécial).
- [4] I. Steller, "Das neue VDG-Merkblatt W 50 : Gusseisen mit Vermiculargraphit", Konstruieren + Giessen, 28 (2003), N° 2, p. 22-24.
- [5] H. Werning et al., "Gusseisen mit Kugelgraphit", Konstruieren + Giessen, 13 (1988) N° 1, p. 1-98 (N° spécial).
- [6] K. Röhrig, 2. Europäische ADI-Entwicklungskonferenz - "Eigenschaften, Bauteilentwicklung und Anwendungen", Konstruieren + Giessen, 28 (2003), N° 1, p. 2-14.
- [7] K. Herfurth, "Austenitisch-ferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit, Teil I : Austenitisierung", Giesserei-Praxis (2003), N° 3, p. 99-106.
- [8] K. Herfurth, "Austenitisch-ferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit, Teil 2 : Unvollständige isothermische Austenitumwandlung", Giesserei-Praxis (2003), N° 4, p. 137-142.
- [9] H. Werning, "Schwarzer Temperguss - Herstellung, Eigenschaften, Anwendungen", Konstruieren + Giessen, 25 (2000) N° 1, p. 27-42.
- [10] K. Röhrig, "Die neue Norm für austenitische Gusseisen", Konstruieren + Giessen, 28 (2003) N° 3, p. 31-32.
- [11] K. Röhrig, "Austenitische Gusseisen", Konstruieren + Giessen, 29 (2004) N° 2, p. 2-33.
- [12] K. Röhrig, "Verschleißbeständige weiße Gusseisenwerkstoffe", Konstruieren + Giessen, 24 (1999) N° 1, (N° spécial).
- [13] K. Herfurth, N. Ketscher, M. Köhler, "Giessereitechnik kompakt-Werkstoffe, Verfahren, Anwendungen", Giesserei-Verlag GmbH, Düsseldorf 2003.
- [14] Y.S. Lerner, "Microstructure and properties of continuous cast ductile cast iron", AFS Transactions, 1993, p. 349-354.