

COMMENT AMÉLIORER L'USINAGE AVANT LE DURCISSEMENT DE SURFACE À BASSE TEMPÉRATURE

RÉSULTATS REPRODUCTIBLES

DURETÉ DE SURFACE ACCRUE

PLUS GRANDE RÉSISTANCE À LA
CORROSION

PROFONDEUR DE DIFFUSION
AMÉLIORÉE





DIMINUER L'INFLUENCE DE L'USINAGE POUR OPTIMISER LES RÉSULTATS

Les procédés Bodycote S³P, dont les procédés brevetés Kolsterising® et S³P ADM, constituent un groupe de procédés de durcissement de surface à basse température (LTSH – Low Temperature Surface Hardening) disponibles sur le marché. Ces procédés permettent d'obtenir une surface dure (> 1 000 HV_{0.05}) et résistante à l'usure sur les composants en acier inoxydable, tout en conservant des propriétés de corrosion supérieures. Le durcissement de surface est généralement réalisé après la dernière étape d'usinage, et constitue l'une des dernières étapes de production avant la mise en service du composant.

Pour obtenir des résultats optimaux en matière de dureté, de profondeur de diffusion et de résistance à la corrosion, il est nécessaire de choisir correctement les paramètres d'usinage, le traitement de surface optionnel et/ou le traitement thermique avant les procédés LTSH. Ce récapitulatif propose des conseils relatifs à l'usinabilité des aciers inoxydables, ainsi que des remarques sur les paramètres d'usinage optimaux pour les différents types d'acier inoxydable.



Usinabilité des aciers inoxydables

L'usinabilité est évaluée en fonction du temps d'usinage total, de la durée de vie de l'outil et de l'état de surface du produit. C'est l'atelier d'usinage qui doit déterminer les paramètres adaptés pour assurer un état de surface uniforme et reproductible à des coûts raisonnables (durée de vie de l'outil et temps). Pour les aciers inoxydables en particulier, l'état de surface a une forte influence sur les propriétés de corrosion. Une surface lisse et uniforme, sans fissures ni rayures, est considérée comme optimale. L'usinabilité des aciers inoxydables est significativement différente de l'usinabilité des aciers doux. En particulier, les aciers inoxydables austénitiques et duplex sont connus pour être difficiles à usiner. L'usinabilité est influencée négativement par la tendance à l'écrouissage, une conductivité thermique médiocre, une ténacité élevée et un comportement de soudage à froid.

Martensite d'écrouissage

En particulier, la tendance à l'écrouissage entraîne la formation de martensite d'écrouissage sur les surfaces usinées. En général, plus la force de coupe est élevée, plus la martensite d'écrouissage est importante. De même, les procédés de formage peuvent entraîner une formation excessive de martensite d'écrouissage. Les surfaces déformées ont une influence négative sur les procédés de diffusion comme Kolsterising® et S³P. La profondeur de diffusion et la dureté peuvent être moins élevées. De plus, la résistance à la corrosion peut être réduite. Les aciers inoxydables austénitiques peuvent devenir magnétiques, un effet secondaire indésirable pour beaucoup d'applications. Il est possible de mesurer directement la quantité de martensite d'écrouissage avec des appareils de mesure spécifiques pour la ferrite. La quantité de martensite d'écrouissage non désirée peut être réduite par un traitement thermique et des techniques de modification de surface spécifiques, présentées dans ce récapitulatif.

Les alliages contenant des sulfures ne sont pas une option lorsqu'une résistance à la corrosion élevée est requise

Dans le but d'améliorer l'usinabilité, une certaine quantité de soufre peut être alliée aux aciers inoxydables ; toutefois, cette mesure n'est pas recommandée, car le soufre forme des lignes d'inclusion au sulfure de manganèse dans le matériau. Ces lignes d'inclusion de sulfures constituent un point faible non seulement pour l'écaillage, mais aussi pour les attaques corrosives. Si une ligne d'inclusion de sulfures est présente à la surface d'une pièce usinée, cela compromettra la formation de la couche passive protectrice dans cette zone. Une attaque corrosive est plus probable dans un environnement corrosif. La résistance à la corrosion de ces alliages à usinabilité améliorée est significativement plus basse que la résistance des alliages austénitiques standards. C'est pourquoi ils ne sont pas adaptés aux applications en environnement corrosif. Des informations supplémentaires sur l'influence du soufre sur la résistance à la corrosion sont données dans un 'Spotlight' sur le sujet (S³P: Considérations relatives au soufre dans les aciers résistant à la corrosion).

Les procédés d'usinage influencent les résultats du durcissement de surface à basse température

Les pages suivantes résument l'influence de différents procédés d'usinage sur les résultats des techniques de durcissement de surface à basse température comme les procédés S³P de Bodycote (Kolsterising® et S³P AMD). Pour optimiser les résultats, il convient d'utiliser des alliages à faible teneur en soufre et des paramètres d'usinage optimisés. Les outils utilisés pour l'usinage d'aciers non alliés ne doivent pas être utilisés pour l'usinage d'aciers inoxydables, car une contamination est toujours possible. Des méthodes de post-traitement peuvent être appliquées si nécessaire.



USINAGE AVEC ARÊTE TRCHANTE DÉFINIE GÉOMÉTRIQUEMENT

Tournage et fraisage

Les aciers inoxydables, en particulier austénitiques et duplex, ont tendance à former une arête rapportée lors de l'usinage. En raison de la conductivité thermique médiocre des aciers inoxydables, une augmentation de chaleur supplémentaire est attendue. Pour optimiser les résultats après un durcissement de surface à basse température, les points suivants doivent être pris en compte*:

- L'usinage des aciers inoxydables nécessite une force plus importante que l'usinage des aciers au carbone. La machine doit donc avoir les capacités suffisantes pour usiner des aciers inoxydables.
- L'outillage et les fixations doivent être aussi solides que possible pour prévenir les vibrations qui entraîneraient un état de surface inégal.
- La vitesse d'alimentation doit être maintenue pendant tout le cycle de traitement, afin de prévenir un écrouissage excessif.
- Une profondeur de coupe plus faible entraînera une réduction de l'effet d'écrouissage sur la surface.
- Des vitesses de coupe plus faibles doivent être envisagées, car les vitesses excessives entraînent une plus grande usure des outils, une plus mauvaise finition de surface et un renouvellement prématuré des outils.
- Le tranchant des outils doit être préservé pour minimiser le frottement entre l'outil et le copeau. Une arête tranchante acérée produit le meilleur état de surface.
- L'utilisation d'un fluide de coupe spécialement conçu pour les aciers inoxydables est recommandée. Les aciers inoxydables étant des conducteurs thermiques médiocres, un refroidissement est nécessaire.

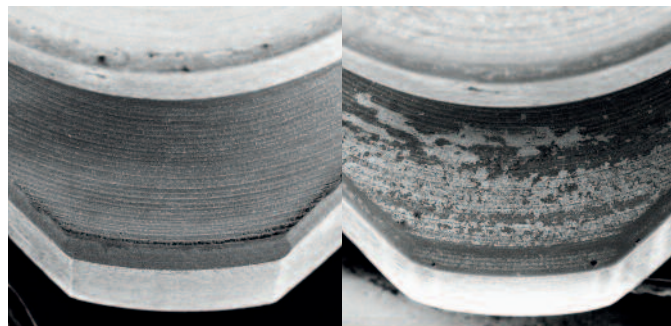


Fig. 1: Surface d'acier inoxydable tourné. Gauche : un outil acéré et des paramètres d'usinage ajustés permettent un état de surface régulier. Droite : un outil usé et une force de coupe élevée entraînent une surface abîmée/une finition irrégulière, avec une résistance à la corrosion réduite, un écaillage et une diffusion médiocre.

En gardant ces éléments à l'esprit, il est possible d'obtenir un bon état de surface et de réduire l'écrouissage (martensite d'écrouissage), ce qui permettra à terme:

- Une profondeur de diffusion plus importante, avec une augmentation de la durée de vie.
- Une dureté de surface plus élevée (car une plus grande quantité de carbone/azote peut être dissoute).
- Le maintien, voire l'amélioration, de la résistance à la corrosion.

Si les bonnes pratiques d'usinage ne donnent pas de résultats suffisants après durcissement de surface à basse température (LTSH – Low Temperature Surface Hardening), un post-traitement supplémentaire, par exemple le recuit ou l'électropolissage, doit être envisagé avant le traitement. La Fig. 1 montre l'influence de l'usure de l'outil sur le résultat après un procédé de LTSH.

* Source: Thyssen Krupp VDM "Verarbeitungshinweise für austenitische Edelstähle und Nickelbasislegierungen"

POST-TRAITEMENT APRÈS USINAGE

En raison des résidus des traitements précédents et des altérations de la surface, il est nécessaire d'appliquer certaines méthodes de post-traitement après l'usinage et avant le durcissement de surface. Toutes ces mesures ne sont pas obligatoires, mais beaucoup sont recommandées.

Nettoyage chimique, dégraissage, décapage

Le nettoyage chimique et le dégraissage constituent une étape obligatoire dans le procédé, après toutes les étapes de l'usinage et avant tout traitement thermique (y compris le durcissement de surface à basse température). Une surface propre et lisse est un facteur clé pour une diffusion sans entrave du carbone et/ou de l'azote à travers la surface de la pièce.

- Les résidus des étapes de production précédentes peuvent jouer un rôle d'inhibiteur de diffusion, en diminuant la profondeur de diffusion et la dureté de surface.
- De plus, les résidus peuvent entraîner après traitement des souillures que l'on ne peut pas toujours éliminer.
- Les particules de fer peuvent entraîner une attaque corrosive localisée (enrouillement instantané).

Une étape supplémentaire de décapage, décalaminage et/ou passivation peut s'avérer nécessaire pour améliorer les propriétés de corrosion des pièces usinées. Avec un décapage, par exemple, il est possible d'éliminer la martensite d'écrouissage qui s'est formée lors des étapes d'usinage précédentes.



Fig. 2: Surface d'acier inoxydable après finition vibratoire. Gauche: surface lisse ($R_a 0.17$) avec peu de défauts, obtenue avec des paramètres ajustés et des abrasifs doux. Droite: fini de surface rugueux ($R_a 0.56$), inclusion d'abrasif et formation excessive de martensite d'écrouissage, entraînant un comportement de corrosion et de diffusion médiocre.

Traitement thermique

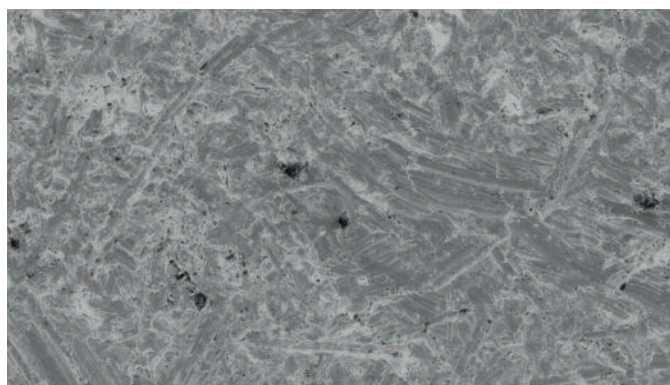
Selon le type d'acier inoxydable et l'application prévue, un traitement thermique peut s'avérer nécessaire avant un durcissement de surface à basse température:

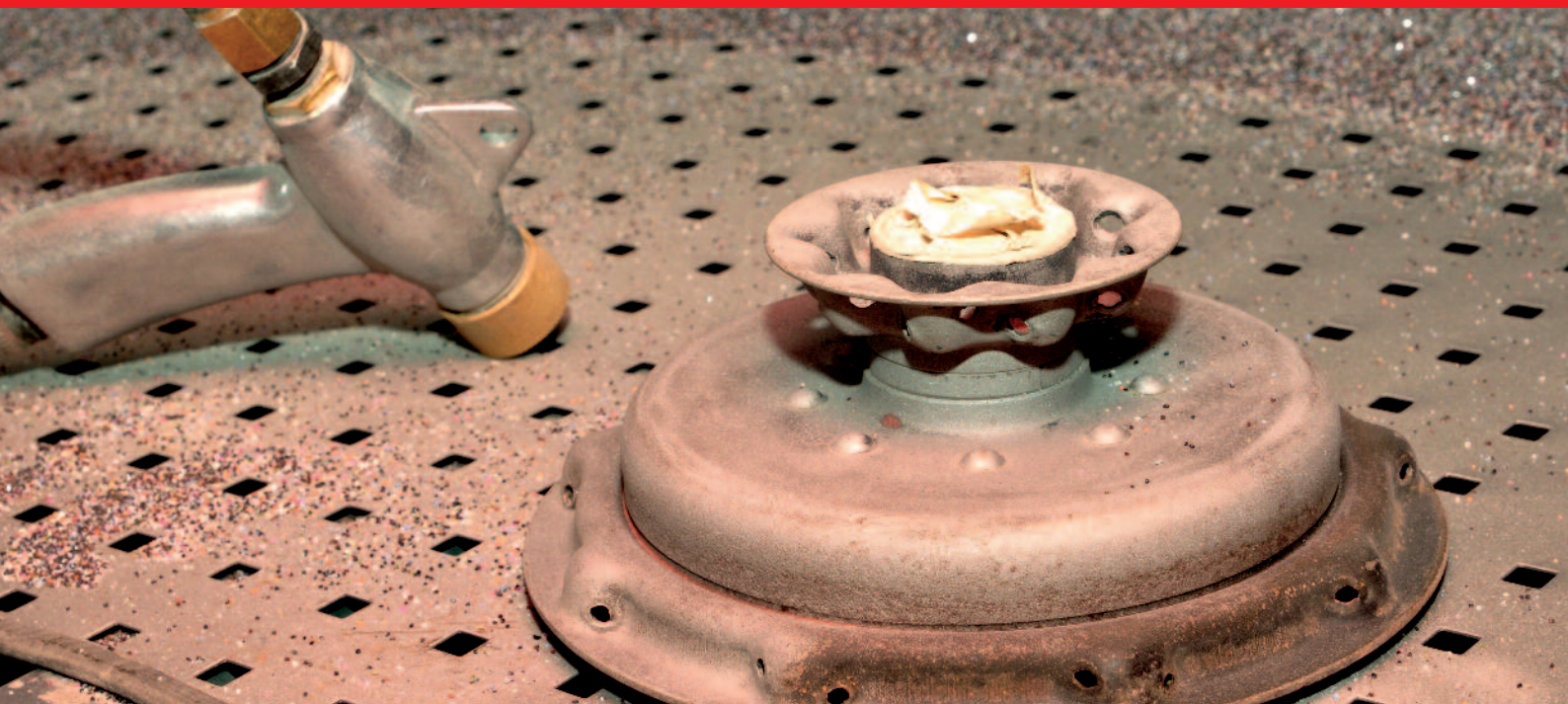
- Un recuit de mise en solution des alliages austénitiques et à base de nickel peut être une option pour améliorer le comportement de corrosion des pièces à surface durcie.
- Les aciers martensitiques et à durcissement par précipitation doivent être en condition de traitement thermique (vieillis ou durcis).

Finition en masse

Les procédés de finition en masse peuvent consister en une finition par finition au tambour ou une finition vibratoire. Il s'agit de deux méthodes économiques pour nettoyer, sécher, ébavurer ou polir des pièces usinées. Les aciers inoxydables étant relativement tendres, les paramètres doivent être adaptés à ces matériaux afin d'obtenir un bon état de surface et une faible formation de martensite d'écrouissage. L'influence des paramètres de finition vibratoire sur la surface des pièces en acier inoxydable est présentée sur la Fig. 2.

- En général, le temps de finition doit être court.
- Les composés et/ou abrasifs utilisés doivent être assez tendres.
- Il est recommandé d'utiliser des machines et additifs dédiés pour traiter les aciers inoxydables afin d'éviter des contaminations ferritiques, qui réduiraient la résistance à la corrosion.
- Après la finition, il convient de mettre en œuvre un nettoyage et un séchage appropriés pour maintenir les propriétés de corrosion.
Les résidus des procédés de finition ou de séchage, tels que composés, abrasifs ou matières organiques, inhibent la diffusion au cours des procédés à basse température.





Électropolissage

En tant que dernière étape avant un procédé de diffusion à basse température, l'électropolissage peut améliorer significativement la finition de surface des pièces usinées.

- Les micro-bosses et creux de la surface sont lissés.
- Les régions fortement altérées de la surface (jusqu'à 50 μm) peuvent être éliminées, permettant une diffusion sans entrave des atomes de carbone et/ou d'azote à travers la surface. La dureté de surface et les profondeurs de diffusion peuvent être augmentées.
- Il en résulte généralement une meilleure résistance à la corrosion et une plus belle apparence visuelle.

Projection de particules

La projection de particules, et notamment le sablage, n'est pas recommandée pour les composants en acier inoxydable si une forte résistance à la corrosion est requise. La Fig. 3 présente l'influence du sablage et de l'électropolissage, avant durcissement de surface à basse température, sur la qualité de surface et sur la diffusion d'un acier AISI 316L.

- Après sablage, la rugosité de la surface est significativement plus élevée, ce qui entraîne une plus grande probabilité d'attaque en environnement corrosif ; par exemple, des chlorures peuvent s'accumuler dans les creux et les sillons formés.
- Les abrasifs résiduels peuvent se coincer dans ces sillons, et favoriser davantage les attaques corrosives.
- La force importante en jeu dans ces types de procédés entraîne une formation excessive de martensite d'écrouissage sur la surface, ce qui conduit à des résultats de diffusion non uniformes.



Zone de diffusion lisse, homogène et sans précipitation sur la surface d'acier inoxydable traitée par électropolissage



Surface rugueuse et zone de diffusion non uniforme après sablage, entraînant une résistance à la corrosion significativement plus faible et un comportement mécanique médiocre

Fig. 3: Comparaison des résultats de LTSH pour un acier AISI 316L après électropolissage (à gauche) et sablage (à droite). Le sablage entraîne d'importantes déformations locales, avec formation excessive de martensite d'écrouissage. La diffusion est entravée et la résistance à la corrosion diminue. En comparaison, les surfaces traitées par électropolissage présentent une zone de diffusion homogène et exempte de défauts.



USINAGE MÉCANIQUE DE PRÉCISION

Meulage et pierrage

La nécessité d'un usinage mécanique de précision provient des tolérances étroites requises pour certaines applications techniques.

Le meulage et le pierrage sont des méthodes d'usinage faisant intervenir une arête tranchante géométriquement indéfinie. Le retrait de matière se fait par des abrasifs, par ex. Al_2O_3 ou SiC , intégrés respectivement dans une meule ou dans une pierre à rectifier. Avec les bons paramètres et les bons abrasifs, il est possible d'obtenir un état de surface précis. L'état de surface a une forte influence sur les propriétés de corrosion et le comportement de diffusion. Avec une force importante, il se forme davantage de martensite d'écrouissage, ce qui compromet les résultats de diffusion sur les pièces traitées par meulage et pierrage. En conséquence, la résistance à la corrosion peut être significativement diminuée. C'est pourquoi il est très important d'ajuster les paramètres de meulage et de pierrage aux aciers

inoxydables, notamment si un durcissement de surface après usinage est nécessaire.

- La pression et la force de coupe doivent être aussi basses que possible afin de réduire la formation de martensite d'écrouissage et de réduire le chauffage excessif de la surface. La conductivité thermique des aciers inoxydables étant faible, un refroidissement correct est nécessaire.
- Les outils doivent être exempts de fer et de chlorures.
- Il faut toujours utiliser des outils acérés. Sinon, la pièce usinée chauffe et la surface se trouve enfoncée et abîmée plutôt que coupée, ce qui augmente le risque de réduction de la résistance à la corrosion. Il est possible de procéder à un délamination régulier de la zone dont la surface est massivement déformée.
- Un post-traitement supplémentaire (par ex. électropolissage) et/ou un recuit doivent être envisagés avant le procédé S³P pour optimiser les résultats.



Fig. 4: Surface d'acier inoxydable tourné. Droite: Avec une force de coupe élevée et un outil usé, la surface est plus déformée que coupée. Gauche: avec une force peu importante et un outil acéré, l'aspect obtenu est naturel pour un meulage correct. Avec moins de déformation, d'apport thermique et de souillage, le comportement de diffusion et la résistance à la corrosion sont améliorés.

FORMAGE ET COUPE

Estampage et emboutissage

Les tôles d'acier inoxydable sont souvent formées par des opérations d'emboutissage ou d'estampage. En raison de la tendance à l'écrouissage, les hauts niveaux de déformation accroissent la résistance et la dureté du matériau. Si les niveaux de déformation sont trop élevés, une ou plusieurs étapes de recuit sont nécessaires pour atténuer les contraintes induites. Sinon, les tôles peuvent se fissurer. De plus, les hauts niveaux de déformation entraînent à terme une quantité excessive de martensite d'écrouissage sur la surface, ce qui perturbe le comportement de diffusion et influence négativement les propriétés de corrosion après le durcissement de surface à basse température. Pour optimiser les résultats après un durcissement de surface à basse température, pour les pièces estampées ou embouties, les directives suivantes doivent être prises en compte:

- Un recuit est recommandé si l'augmentation de résistance due à la déformation n'est pas nécessaire.
- En raison de l'écrouissage des aciers inoxydables, des pressions plus élevées sont requises pour l'emboutissage et l'estampage.
- En raison de la tendance au grippage de l'acier inoxydable, la friction doit être aussi faible que possible lors des opérations de formage. Cela peut être obtenu par une lubrification correcte et un poteyage.

Découpage et poinçonnage

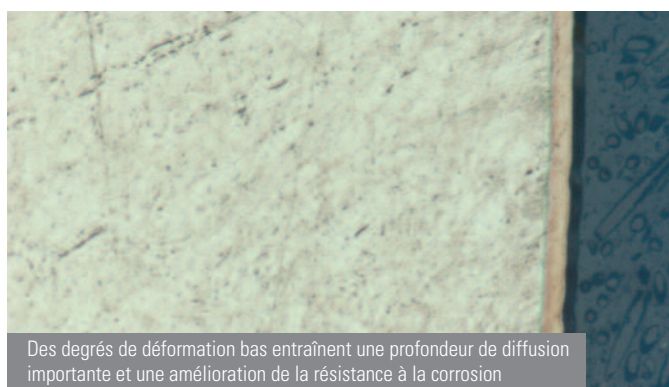
Au lieu d'un usinage coûteux en temps, la méthode de découpage et poinçonnage peut s'avérer rapide et rentable pour produire des pièces géométriques simples de dimensions données, notamment en production de masse.

- Selon la méthode choisie, un post-traitement et un ébavurage peuvent s'avérer nécessaires. Des bavures et des irrégularités de surface apparaissent dans la zone dite de fracture. Dans cette zone, le matériau est dénudé et abîmé plutôt que coupé. Les propriétés de l'acier inoxydable impliquent certaines contraintes qui doivent être prises en compte.
- La tendance au grippage nécessite un revêtement d'outil et une lubrification correcte. En raison de l'écrouissage, les forces de découpage/poinçonnage sont significativement plus élevées par rapport aux aciers au carbone.
- La forte résilience des aciers inoxydables peut entraîner des défauts de surface et des chevauchements dans la zone de coupe.
- Il en résulte non seulement une formation excessive de martensite d'écrouissage, mais aussi des fissures qui peuvent constituer un point faible pour la corrosion.
- Pour améliorer la qualité de surface après le découpage, une option possible est le découpage fin. Cette méthode améliore la qualité de surface. Le post-traitement peut être omis, ce qui peut compenser les coûts d'outillage plus élevés.

La Fig. 5 présente la zone de fracture après le poinçonnage et le durcissement de surface à basse température qui suit (à gauche). La forte déformation et la qualité de surface médiocre dans la zone de fracture entraînent une profondeur de diffusion plus faible.



Des degrés de déformation élevés entraînent une faible profondeur de diffusion et des défauts dans la zone de diffusion



Des degrés de déformation bas entraînent une profondeur de diffusion importante et une amélioration de la résistance à la corrosion

Fig. 5: Composant en acier inoxydable à surface durcie. Gauche: Surface poinçonnée. Surface irrégulière et fortement déformée (zones sombres). Dans cette zone, la profondeur de diffusion est réduite et les propriétés de corrosion sont altérées. Droite: la même pièce, alésée plutôt que poinçonnée. Les déformations moins importantes et l'état de surface régulier permettent une profondeur de diffusion plus importante et une amélioration des propriétés de corrosion.



MOULAGE ET PROCÉDÉS À BASE DE POUDRE

Moulage

Différentes méthodes de moulage, comme le moulage au sable et le moulage sous pression, peuvent être utilisées pour former des pièces complexes, avec des dimensions intérieures complexes, en une seule étape de procédé. Cependant, la qualité de surface dans des conditions de moulage est souvent insuffisante pour les applications techniques, et un post-usinage est nécessaire.

- Les impuretés présentes à la surface de la pièce après le moulage peuvent compromettre les propriétés mécaniques et les propriétés de corrosion par rapport à un matériau forgé de composition comparable. Des inclusions de scories ou de sable sur la surface peuvent également influencer négativement la résistance à la corrosion.
- En raison de la vitesse de refroidissement relativement lente, la formation d'une structure partiellement ferritique (δ -ferrite) est possible. Si la teneur en δ -ferrite dépasse 3 % vol., il faut s'attendre à un effet négatif sur le comportement de diffusion et la résistance à la corrosion. Il est possible de réduire la teneur en δ -ferrite après le moulage avec un traitement thermique supplémentaire si nécessaire.

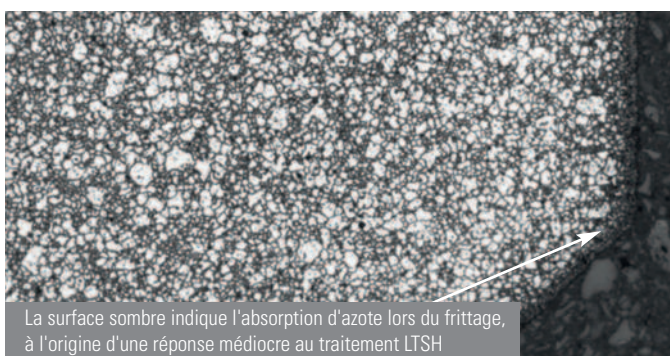


Méthodes de fabrication additive

Les méthodes de fabrication additive, comme le moulage par injection de métal (MIM – Metal Injection Moulding) et la fusion sélective par laser (SLM – Selective Laser Melting), sont des méthodes de production relativement nouvelles, fondées sur la métallurgie des poudres. Tous les procédés appartenant à ce groupe conviennent en principe pour le traitement des aciers inoxydables. Alors que les procédés MIM sont adaptés aux lots de grande taille, les procédés SLM conviennent plutôt à la production de pièces individuelles.

Les procédés MIM sont comparables à des procédés de moulage par injection de polymères. La poudre métallique est mélangée à un liant polymère, et formée avec des machines de moulage par injection. Après le procédé de moulage, le liant doit être éliminé et la poudre métallique doit être agglomérée par frittage dans un four, sous vide ou avec du gaz protecteur.

- Le gaz protecteur utilisé peut avoir un effet sur les résultats si une pièce MIM doit recevoir un traitement Kolsterising®.
- Habituellement, le gaz est un mélange d'hydrogène et d'azote (H_2/N_2) qui forme une atmosphère réductrice pour prévenir l'oxydation. Dans certains cas, l'azote peut diffuser à la surface de la pièce frittée, faisant obstacle à la diffusion lors du procédé de LTSH.



- Si l'azote pose problème lors du frittage, un traitement sous vide doit être envisagé.

La Fig. 6 présente une pièce frittée avec une surface ayant subi une diffusion d'azote dans une atmosphère H_2/N_2 . Un alésage ultérieur (à droite) a permis d'éliminer la surface touchée. Dans cette zone, une diffusion sans entraves est possible.

Les procédés sélectifs par laser sont un groupe de procédés permettant de produire des pièces à partir d'un lit de poudre au moyen d'un rayon laser. Les pièces sont élaborées couche par couche, ce qui permet de n'avoir presque pas de contraintes géométriques. L'un des inconvénients est que la qualité de surface est relativement médiocre, ce qui rend le post-traitement nécessaire. De plus, les paramètres optimaux doivent être déterminés pour minimiser la porosité.

- Les pores peuvent réduire les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion, car ils agissent comme des fissures.
- La porosité extérieure et les imperfections de surface peuvent être réduites par un post-traitement adapté.
- Les pores internes peuvent être comblés par une compression isostatique à chaud (HIP). Un tel procédé permet d'augmenter davantage la résistance mécanique.

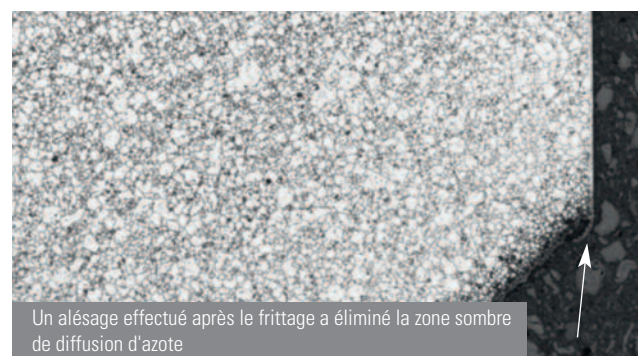


Fig. 6: Section transversale frittée d'une pièce en acier inoxydable MIM. La diffusion d'azote (surface sombre) empêche une bonne diffusion lors du traitement LTSH, compromettant la dureté de surface. Un alésage ultérieur (à droite) a permis d'éliminer partiellement la zone de diffusion de l'azote. Une diffusion sans entrave est possible dans cette zone.

www.bodycote.com

