

Le Potentiel de l'Acier Inoxydable au Formage



Euro Inox

Euro Inox est l'association européenne pour le développement de l'acier inoxydable.

Les membres d'Euro Inox sont :

- les producteurs européens d'acier inoxydable,
- les associations nationales de développement de l'acier inoxydable,
- les associations représentant les producteurs d'éléments d'alliage.

Euro Inox a pour principal objectif de faire connaître les caractéristiques spécifiques des aciers inoxydables. L'association vise également une utilisation accrue de l'acier pour les applications déjà existantes et la promotion de nouveaux marchés. Euro Inox organise des conférences et des séminaires et publie des guides techniques sous forme imprimée et électronique. Elle s'adresse aux architectes, auteurs de projet, responsables des matériaux, transformateurs et utilisateurs pour les familiariser avec ce matériau. Euro Inox soutient également des recherches techniques et assure des études de marché.

ISBN 978-2-87997-212-1

978-2-87997-211-4	version anglaise
978-2-87997-213-8	version italienne
978-2-87997-214-5	version espagnole
978-2-87997-215-2	version finnoise
978-2-87997-216-9	version suédoise
978-2-87997-217-6	version néerlandaise
978-2-87997-218-3	version allemande
978-2-87997-219-0	version polonaise
978-2-87997-220-6	version tchèque
978-2-87997-221-3	version turque

Membres à part entière

Acerinox

www.acerinox.es

ArcelorMittal Stainless Belgium

ArcelorMittal Stainless France

www.arcelormittal.com

Outokumpu

www.outokumpu.com

ThyssenKrupp Acciai Speciali Terni

www.acciaiterni.it

ThyssenKrupp Nirosta

www.nirosta.de

Membres associés

Acroni

www.acroni.si

British Stainless Steel Association (BSSA)

www.bssa.org.uk

Cedinox

www.cedinox.es

Centro Inox

www.centroinox.it

Informationsstelle Edelstahl Rostfrei

www.edelstahl-rostfrei.de

Institut de Développement de l'Inox (I.D.-Inox)

www.idinox.com

International Chromium Development Association (ICDA)

www.icdachromium.com

International Molybdenum Association (IMO)

www.imoa.info

Nickel Institute

www.nickelinstitute.org

Paslanmaz Çelik Derneği (PASDER)

www.turkpasder.com

Polska Unia Dystrybutorów Stali (PUDS)

www.puds.pl

SWISSINOX

www.swissinox.ch

Le Potentiel de l'Acier Inoxydable au Formage
 Première édition 2008
 (Série Matériaux et Applications, Volume 8)
 © Euro Inox 2008

Editeur

Euro Inox
 Siège de l'organisation :
 241 route d'Arlon, 1150 Luxembourg
 Grand-Duché du Luxembourg
 Tél. : +352 26 10 30 50 / Fax : +352 26 10 30 51
 Direction générale
 Diamant Building, Bd. A. Reyers 80
 1030 Bruxelles, Belgique
 Tél. : +32 2 706 82 67 / Fax : +32 2 706 82 69
 E-mail : info@euro-inox.org
 Site Web : www.euro-inox.org

Auteur

Benoît Van Hecke, Hasselt (B)

Traduction

Marie-Christine Danel, Maresquel-Ecquemicourt (F)

Crédits photos

Photographies de couverture :

- HDE Solutions, Menden (D)
- ThyssenKrupp Nirosta, Krefeld (D)
- Alessi, Crusinallo (I)

Limite de responsabilité

Euro Inox a fait de son mieux pour que les informations présentées dans cette publication soient techniquement correctes. Cependant, le lecteur est avisé que son contenu n'a qu'un but d'information générale. Euro Inox, ses membres, son personnel et ses consultants, rejettent expressément toute responsabilité juridique ou financière en cas de perte, dommage ou blessure résultant de l'utilisation des informations contenues dans ce document.

Sommaire

1. Introduction	3
2. Caractéristiques mécaniques	4
3. Potentiel de formage de l'inox	5
4. Finition de surface	5
5. Nœuds hydroformés pour châssis automobiles	6
6. Conception hygiénique grâce à des surfaces sans soudure	8
7. Efficacité des pompes grâce à des corps hydroformés	10
8. Repoussage de métal pour des formes exclusives	12
9. Jantes de roues décoratives par repoussage	14
10. Profilés laminés à froid pour une résistance inégale	16
11. Plaques d'échangeurs thermiques formées par explosion	18
12. Cache-écrous par emboutissage profond pour la décoration de roues	20
13. Tôle ondulée pour des capacités de fret plus importantes	22
14. Références	24

Droit d'auteur

Cet ouvrage est protégé par le droit d'auteur. Euro Inox détient tous les droits de traduction dans toute langue, de réimpression et de réutilisation des illustrations, citations et radio- et télédiffusion. Il est interdit de reproduire une partie quelconque de cette publication, de la stocker dans un système d'archivage, ou de la transmettre sous une forme quelconque par n'importe quel moyen, électronique, mécanique, photocopie, enregistrement ou autre, sans l'autorisation écrite préalable du propriétaire des droits de reproduction, Euro-Inox, Luxembourg. Les contrevenances peuvent être passibles de poursuites judiciaires et de versement de dommages et intérêts ainsi que des dépens et frais juridiques, et sont passibles de poursuites aux termes de la législation du Luxembourg sur le droit d'auteur et de la réglementation de l'Union Européenne.

A propos des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont des alliages de fer avec une teneur minimale en chrome de 10,5 % (du poids) et un maximum de 1,2 % en carbone, nécessaires pour assurer la formation d'une couche d'oxyde autoréparante – appelée couche passive – qui apporte une résistance à la corrosion à l'alliage. C'est la définition des aciers inoxydables suivant l'EN 10088-1.

La teneur en éléments d'alliage influence largement la structure métallurgique de l'acier inoxydable et elle détermine quatre familles d'acier inoxydable, chacune avec ses propres caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques¹ :

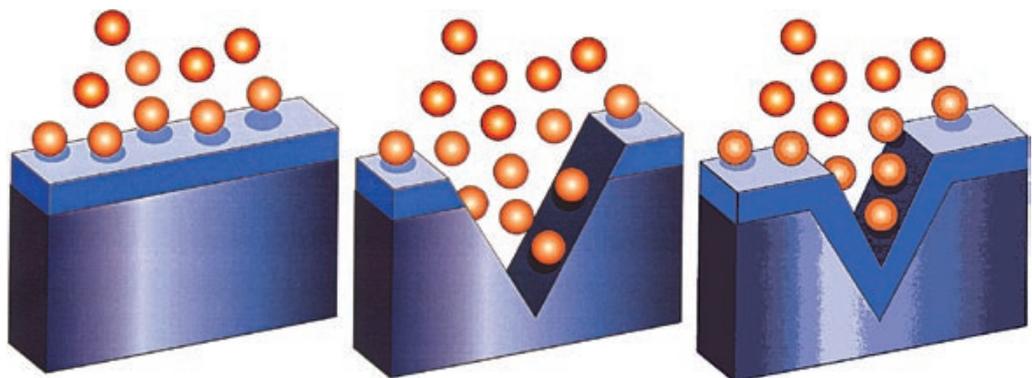
- Aciers inoxydables austénitiques : Fe-Cr-Ni, C < 0,1 % (amagnétiques)
- Aciers inoxydables ferritiques : Fe-Cr (> 10,5 %), C < 0,1 % (magnétiques)
- Aciers inoxydables duplex : Fe-Cr-Ni, structure combinée austénitique-ferritique (magnétique)
- Aciers inoxydables martensitiques : Fe-Cr, C > 0,1 % (magnétiques et aptes à la trempe)

Ces familles comportent également des nuances contenant d'autres éléments, comme du molybdène, du titane, du niobium et de l'azote. Les aciers inoxydables austénitiques représentent approximativement les deux tiers de l'utilisation de l'acier inoxydable dans le monde.

Les nuances austénitiques EN 1.4301/1.4307 (AISI 304/304L) et EN 1.4401/1.4404 (AISI 316/316L), la nuance ferritiques EN 1.4016 (AISI 430) et leurs variantes, sont les aciers inoxydables les plus connus et dont la commercialisation est la plus largement répandue.

Les principales caractéristiques de l'acier inoxydable peuvent se résumer de la façon suivante :

- résistance à la corrosion
- attrait esthétique
- résistance à l'oxydation
- faible coût de cycle de vie (peu d'entretien)
- recyclabilité totale
- neutralité biologique
- facilité de mise en œuvre
- rapport élevé résistance mécanique-poids



Si la surface de l'acier inoxydable est usinée ou endommagée accidentellement, la couche passive se reforme instantanément, en présence de l'oxygène de l'air ou de l'eau.

¹ Pour de plus amples informations concernant les caractéristiques chimiques, mécaniques et physiques des aciers inoxydables, consulter le site www.euro-inox.org/technical_tables (base de données interactive) ou la brochure *Tables of Technical Properties* (Materials and Applications Series, Volume 5), 2ème édition, Luxembourg: Euro Inox, 2007.

1 Introduction

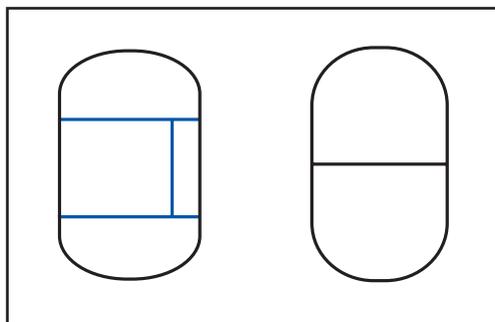
L'acier inoxydable présente une grande aptitude à la mise en forme, en raison de ses excellentes caractéristiques mécaniques. Grâce à un rapport élevé résistance mécanique-poids du matériau et ses caractéristiques uniques à l'allongement et à l'érouissage, il peut répondre à beaucoup de formes complexes, en trois dimensions et sans soudure.

Comme son utilisation dans ces conceptions ne modifie aucune de ses qualités bien connues de résistance à la corrosion et à l'oxydation, de même qu'esthétiques, l'acier inoxydable constitue souvent un matériau de choix pour des produits destinés à la fois aux industries et aux consommateurs.

Le coût de fabrication comprend :

- le coût de la matière
- le coût de la transformation

Bien que l'acier inoxydable ne soit pas toujours le matériau le moins cher, les simplifications dans le processus de fabrication auxquelles son utilisation peut conduire, peuvent largement compenser le coût plus élevé d'achat de la matière – par exemple, en réduisant le nombre de passes d'emboutissage ou les traitements thermiques.



Les fûts à bière et à boissons (généralement de 20 à 770 l) peuvent être fabriqués de différentes façons, grâce aux caractéristiques polyvalentes de l'acier inoxydable. Les conceptions en trois éléments (exemple de gauche) constituent une option, avec deux fonds bombés et une tôle en acier inoxydable érouie pour la partie médiane. L'érouissage de l'acier inoxydable laminé à froid renforce ses caractéristiques mécaniques. L'utilisation d'une tôle érouie pour la partie médiane va améliorer la résistance mécanique du fût ou rendre possible l'utilisation de parois plus minces pour une résistance mécanique identique. Cette conception peut avoir la préférence si une diminution du poids est un facteur-clé.

En alternative, la capacité au formage de l'acier inoxydable permet une conception en deux parties (exemple de droite), composée de moitiés identiques embouties. Cette conception est préférable lorsque l'allègement en poids est le paramètre essentiel. En dehors de son potentiel au formage, l'acier inoxydable est le matériau le mieux adapté au contact alimentaire car il répond aisément aux Réglementations Européennes sur la sécurité alimentaire.



Conception en trois éléments par rapport à deux éléments. Photos : AEB, Vimercate (1)

2 Caractéristiques mécaniques

Evaluer l'aptitude à la mise en forme de tout matériau implique de comprendre ses caractéristiques mécaniques. Parmi les critères d'évaluation mécanique les plus courants, on peut citer :

Résistance mécanique : le degré de résistance d'un matériau à la déformation peut se définir, soit en terme de :

- « élasticité » ou déformation plastique permanente (d'où « limite élastique » R_p), ou par
- « rupture » (d'où « résistance à la traction » R_m)

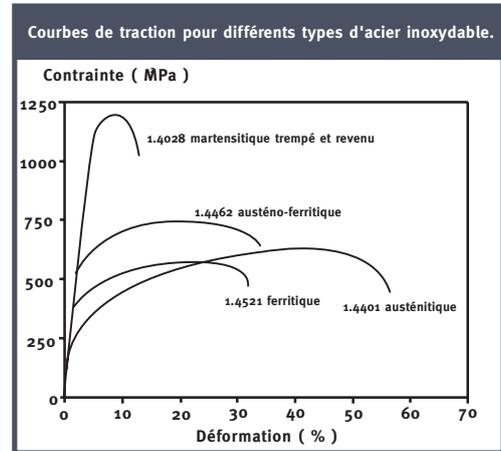
Dureté : le degré de résistance à l'indentation permanente par une charge appliquée.

Ténacité : la capacité à absorber l'énergie de déformation avant rupture.

Ductilité : la capacité à la déformation plastique sans rupture.

Les concepts « résistant » et « faible », « dur » et « mou », « tenace » et « fragile » définissent les différents aspects des caractéristiques mécaniques d'un matériau et il ne faut pas les confondre. Certaines de ces caractéristiques peuvent être mesurées par un essai de traction. Généralement, la mise en graphique des résultats d'un essai de traction pour différents aciers inoxydables mesure la contrainte en fonction de l'allongement relatif.

L'extrémité des courbes correspond au pourcentage d'allongement à la rupture et à une mesure de la ductilité du matériau. La zone en dessous de chaque courbe indique la quantité d'énergie absorbée par le matériau avant qu'il ne casse — et constitue ainsi une mesure de sa ténacité.



Les aciers martensitiques disposent d'une résistance élevée à la traction et d'une faible ductilité (ou formabilité) tandis que les aciers austénitiques ont une résistance à la traction moindre et une ductilité élevée. Les aciers austéno-ferritiques (ou duplex) et les aciers ferritiques occupent une position intermédiaire. La limite élastique des aciers ferritiques est généralement supérieure à celle des aciers austénitiques, alors que la limite élastique du duplex est bien plus élevée que celle à la fois des nuances ferritiques et austénitiques. Les aciers ferritiques et duplex ont une ductilité similaire².

A l'exception des aciers inoxydables martensitiques, les relations habituelles qui figurent dans le graphique sont valables pour l'état recuit dans lequel les aciers inoxydables sont généralement fournis. Pour ne rien omettre et bien comprendre le potentiel de l'acier inoxydable au formage, il est important de savoir que les caractéristiques mécaniques du matériau dépendent :

- de l'analyse chimique
- du traitement thermique (pour les aciers inoxydables martensitiques)

² Vous trouverez de plus amples informations concernant la particularité des essais de dureté et de ténacité (que l'on appelle également « résistance au choc ») pour les aciers inoxydables dans : CUNAT, Pierre-Jean, Travailler les aciers inoxydables (Série Matériaux et Applications, Volume 2), Paris: Sirpe, 1998.

- de l'écrouissage (pour les aciers inoxydables austénitiques et duplex).

Cette dernière propriété s'applique au fait que l'on peut atteindre des niveaux élevés de résistance mécanique grâce à l'écrouissage des aciers inoxydables. En effet, ce comportement de durcissement

par écrouissage distingue ces aciers de la plupart des autres matériaux métalliques. Toutefois, les aciers inoxydables austénitiques et duplex offrent généralement une combinaison intéressante de résistance mécanique et d'aptitude au formage, qui permet des gains de poids.

3 Potentiel au formage de l'inox

Pour illustrer le potentiel au formage de l'acier inoxydable, nous présentons neuf études de cas de conceptions aussi bien pour des applications industrielles que pour la vie courante. Chaque étude de cas décrit succinctement :

- les principes de l'opération de formage
- les caractéristiques du matériau pour le produit désigné
- les propriétés qui rendent l'acier inoxydable éligible
- la fabrication actuelle du produit avec de l'acier inoxydable³

4 Finition de surface

La Norme Européenne EN 10088-2 donne des informations concernant les états de surface disponibles (et leur terminologie) pour l'acier inoxydable⁴. Parmi les états de surface les plus courants et leurs plages habituelles d'épaisseurs pour des applications en formage, on peut citer :

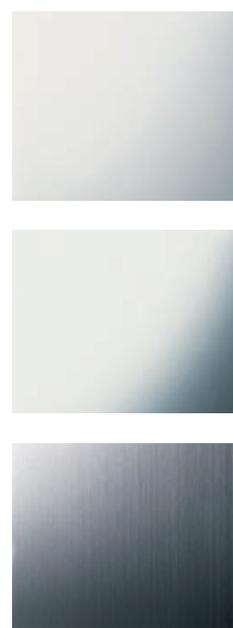
- laminé à froid glacé 2B (0,40 – 8,00 mm)
- laminé à froid recuit brillant 2R (< 3,00 mm)
- laminé à froid poli (2G) ou brossé (2J)

On utilise également des états de surface laminés à chaud (1D ; > 2,00 mm) et écrouis (2H ; < 6,00 mm).

Pour la plupart des matériaux, une importante déformation dégrade généralement l'aspect de surface. Dans le cas

de l'acier inoxydable, toutefois, on peut souvent obtenir des formes relativement complexes sans la nécessité d'un parachèvement mécanique. Par exemple, certains éviers économiques en acier inoxydable sont fabriqués directement à partir d'une tôle d'acier inoxydable en recuit brillant (2R) sans aucun polissage supplémentaire. Le fait que l'état de surface subsiste après l'opération de formage rend la combinaison du matériau et de la technique de formage avantageuse.

Etats de surface généralement aptes au formage : 2B, 2R et 2G/2J.



³ Cette brochure est destinée à indiquer des processus sélectionnés qui optimisent l'utilisation du potentiel de formage de l'acier inoxydable. Pour de plus amples informations concernant les sociétés qui peuvent les mettre en œuvre, contacter Euro Inox ou ses membres.

⁴ Voir l'Annexe B du *Guide des états de surface de l'acier inoxydable* (Série Construction, Volume 1), Luxembourg : Euro Inox, 2000.

5 Nœuds hydroformés pour châssis automobiles

Avec l'hydroformage, il est possible de créer des formes complexes à partir de tubes. Cela implique :

- d'insérer un tube en acier inoxydable dans la matrice
- d'obturer les deux extrémités
- de remplir le tube de fluide (généralement de l'eau ou de l'huile)
- d'exercer une pression sur l'acier inoxydable par l'effet combiné de la pression (radiale) du fluide et de la compression (axiale) des extrémités de tubes.

Le processus, qui peut être utilisé pour former pratiquement toute forme complexe, présente les avantages suivants par rapport aux techniques conventionnelles :

- surface de la pièce intacte (aucun grip-page de poinçon ou de coloration par le lubrifiant)
- tolérances de forme plus serrées

Fabrication de nœuds pour châssis automobiles

On tend à considérer les « squelettes tubulaires automobiles » en métal (image en bas à gauche) comme des solutions pour assembler des carrosseries. Dans la réalité, les fabricants de bus appliquent ce



Outil d'hydroformage et photo : ArcelorMittal Centre Auto-Applications, Montataire

principe depuis des années, à l'aide d'une structure de tubes soudés en acier inoxydable. Traditionnellement, cela a impliqué l'utilisation d'assemblages effectués par cintrage, découpage et soudage (image en haut à droite).

Parmi les avantages de l'assemblage de nœuds hydroformés, on peut citer :

- le remplacement d'assemblages soudés traditionnels de tubes complexes coupés à longueur
- la séparation des cordons de soudure et de la découpe de la zone déformée

Parmi les points forts, on peut noter :

- standardisation de la fabrication
- solutions modulaires
- rigidité et résistance mécanique supérieures avec un allègement du poids
- diminution des coûts

Conception I: P-J Cunat, Joinville-le-Pont (F)

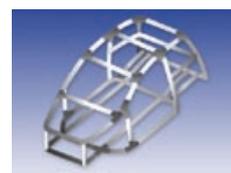


Photo: HDE Solutions, Menden (D)



Assemblage de squelette tubulaire automobile avec nœuds hydroformés. Photo: ArcelorMittal Stainless Europe, La Plaine Saint-Denis (F)

Comportement en déformation de l'acier inoxydable lors de l'hydroformage

Lors de l'hydroformage, certaines zones se déforment largement, ce qui conduit à un « durcissement par écrouissage » du métal. Cet avantage supplémentaire de l'acier inoxydable conforte les propriétés mécaniques du composant en renforçant son comportement statique et à la fatigue.

Les zones déformées, lorsque la déformation est au maximum, se situent à l'extérieur des zones soudées. Cela est à l'opposé d'un assemblage classique, dans lequel les zones soudées sont aussi les zones les plus critiques.



Noeud hydroformé
Photo: HDE Solutions,
Menden (D)

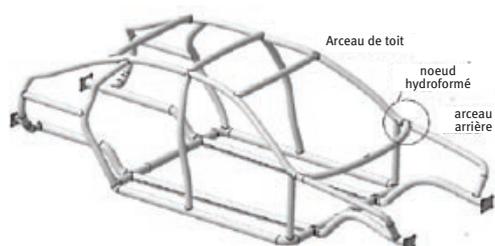
Avantages d'un noeud hydroformé en acier inoxydable

Parmi les atouts d'une combinaison hydroformage et acier inoxydable, on peut citer :

- un meilleur alignement axial
- une perpendicularité parfaite (aucun risque de déformations thermiques à la suite du soudage)
- la possibilité d'un soudage automatisé (sur le noeud plutôt qu'à l'intérieur du noeud)

- une précision inégalée épaisseur/géométrie
- une meilleure répartition des tensions

Résultat : moins de pièces, moins de ferrailage, moins de matrices et de matière, d'où une réduction du coût.



Conception et photographie : ArcelorMittal Stainless Europe, La Plaine Saint-Denis (F)

6 Conception hygiénique grâce à des surfaces sans soudure

Parmi les critères de conception applicables aux ustensiles de cuisine pour le contact alimentaire, on peut citer :

- surfaces hygiéniques, faciles à nettoyer
- diffusion thermique efficace (pour la cuisson), avec toutefois des poignées anti-chaueur
- résistance aux chocs et à l'usure

Au-delà des aspects techniques, des considérations de mode de vie ajoutent des critères de finition et de forme à la liste. Le processus de fabrication d'un faitout haut de gamme, représenté ci-dessous, montre pourquoi l'acier inoxydable a constitué le matériau de choix pour répondre à ces défis depuis des décennies.

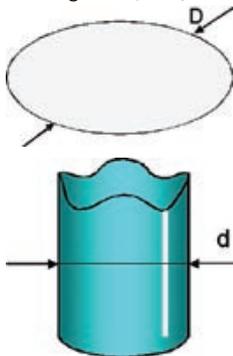
Transformation d'un disque plat en métal en un corps creux



De façon surprenante, la fabrication de cet élégant récipient commence à partir d'un disque plat, d'une épaisseur de 1 mm et d'un diamètre de 400 mm environ. La nuance EN 1.4301 avec une finition laminée à froid 2B (l'état de livraison du laminoir) va absorber la déformation considérable appliquée par la ou les presse(s) concernée(s). Le diamètre du disque est réduit de moitié lors de ce processus – ce qui constitue à peu près la limite de capacité⁵ de formage du matériau.

L'acier inoxydable peut supporter des formes plus profondes, à condition que sa capacité de déformation plastique soit restaurée. Cela s'effectue grâce à un traitement thermique intermédiaire (le recuit) à plus de 1000 °C. A ces températures, les surfaces en acier inoxydable s'oxydent. Comme cette surface noirâtre pourrait contaminer l'outillage en aval des presses et rendre le polissage plus difficile, un traitement chimique est effectué à la surface pour l'éliminer et restaurer l'état passif de la surface. La forme cylindrique restaurée peut désormais être emboutie en des longueurs plus importantes.

Rapport limite d'emboutissage (LDR - Limiting Drawing Ratio) = D/d .



Les valeurs LDR courantes pour les aciers inoxydables se situent entre 1.8 et 2.



⁵ Le rapport limite d'emboutissage (LDR - Limiting Drawing Ratio) désigne le facteur du diamètre maximal de flan (D) qui peut être embouti en une étape par un cylindre de diamètre (d).

De l'embouti à l'objet final

Pour l'adapter au chauffage à induction, on applique sur le fond du récipient un disque d'acier inoxydable ferritique (Cr). Ce dernier est magnétique, contrairement à l'acier inoxydable austénitique (Cr-Ni) à partir duquel le corps est fabriqué.

Pour une diffusion optimale de la chaleur, on insère un disque en aluminium entre les deux. Les trois éléments sont assemblés par une opération de frappe à froid et de brasage.



Bien que l'aspect mat du disque initial n'ait rien de l'aspect d'un ustensile de cuisine de haut de gamme, sa rugosité de surface est suffisamment faible pour rendre un bon parachèvement post-fabrication.

Dès que les principales étapes d'assemblage sont terminées, le corps du récipient peut être meulé et poli. Il existe de nombreux produits à grains abrasifs, de tampons Scotch-Brite™ et de pâtes d'avivage (pour la finition finale).



Le formage de l'acier inoxydable ne se limite pas à des formes cylindriques. On peut apporter un profilé courbe plus complexe (à gauche sur la photo) au cylindre (à droite) à l'aide d'une matrice en métal en deux parties de la forme finale exigée, et d'un emporte-pièce (au centre) constitué d'une série de disques de polymère dur de caractéristiques variables.

Un matériau convenant bien aux applications hygiéniques

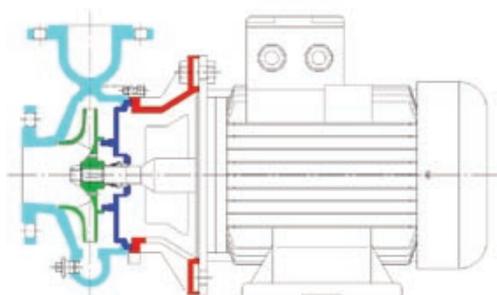
Grâce à ses propriétés de soudage, de formage et de finition, l'acier inoxydable répond facilement aux impératifs des ustensiles de cuisine qui se caractérisent par une forme sans soudure (pour l'hygiène), des surfaces anti-adhérentes, une rigidité à long terme, une adaptabilité au chauffage à induction, etc. L'utilisation de ces formes peut être étendue, en dehors de la batterie de cuisine, à d'autres applications avec des impératifs d'hygiène.



Les poignées, fabriquées à partir d'une barre ronde ou plate, sont soudées au corps du récipient. En limitant la surface de contact et avec de l'acier inoxydable austénitique (qui dispose d'une conductivité thermique plus faible que d'autres aciers), elles sont optimisées pour une utilisation en toute sécurité et anti-chaleur.

7 Efficacité des pompes grâce à des corps hydroformés

Principaux éléments
d'une pompe centrifuge
traditionnelle



Une pompe centrifuge augmente l'énergie (crée par un moteur) du fluide qui y circule, en le déplaçant et en augmentant sa pression. Elle est principalement composée :

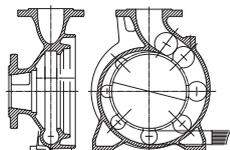
- d'un moteur électrique et un axe
- d'un corps fixe (bleu clair)
- d'une turbine en rotation (vert)
- d'un joint (bleu) et un support (rouge)

La turbine transforme l'énergie du moteur en énergie de fluide (cette dernière étant la somme de la pression, de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle).

La finalité hydraulique du corps est de guider le fluide dans la turbine côté entrée, de séparer la zone de basse pression de celle de la haute pression et d'entraîner le fluide à s'échapper de la turbine vers la sortie, en augmentant encore sa pression par la diminution de sa vitesse. D'un point de vue mécanique, le corps doit résister à la pression en service, maintenir la pompe (en fonction du modèle) et absorber les tensions des canalisations qui y sont reliées.

Le rôle du corps en spirale

De façon à augmenter encore la pression du fluide lorsqu'il quitte les aubes de turbine, le corps se caractérise par une forme en spirale, dont la section transversale aug-



Forme de corps en spirale

mente en même temps que la spirale s'allonge. Cela permet à la vitesse du fluide de diminuer (nécessaire pour augmenter sa pression) avec un minimum de frottement. La fabrication d'un corps en spirale métallique qui respecte ces principes complexes de conception, constitue véritablement un challenge.

Des corps moulés aux corps emboutis

La démarche habituelle est d'utiliser des pièces moulées en fonte, en acier ou en bronze pour le corps. Récemment, des corps par emboutissage profond en acier inoxydable sont apparus, combinant un rapport résistance/poids supérieur et les propriétés



Corps en fonte



Corps en acier inoxydable par emboutissage profond

inégales de mise en forme de l'acier inoxydable, pour élaborer un produit à la fois très léger et mécaniquement très résistant.

Avantages de l'acier inoxydable



Pompe centrifuge avec corps en acier inoxydable

Les corps en acier inoxydable garantissent :

- une absence de contamination par le matériau du corps (par ex. pour l'eau potable)
- résistance à la corrosion dans une large gamme de milieux moyennement agressifs
- poids réduit tout en améliorant les caractéristiques mécaniques (ce qui donne des pompes compactes faciles à manipuler)
- aspect de surface attractif et facilité d'entretien



Corps de pompe à partir d'un flan embouti en acier inoxydable. L'entrée se situe à l'avant et le liquide s'échappe du corps grâce à un orifice hydroformé sur le dessus.

- efficacité inégalée de la pompe grâce à une surface lisse

Avantages de l'hydroformage

La conception des corps peut s'avérer très simple (à section transversale circulaire) ou très complexe (par l'intégration d'un corps en spirale). Ce dernier, généralement fabri-



Le corps en spirale s'intègre dans le corps de pompe par hydroformage. L'orifice d'évacuation est particulièrement soigné pour renforcer l'efficacité en service.

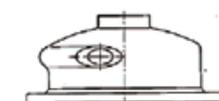
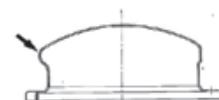
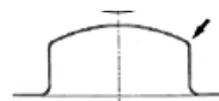
qué en soudant deux coquilles ensemble, offre une efficacité renforcée de la pompe. L'hydroformage, toutefois, rend possible l'intégration du corps en spirale dans une conception de corps en acier inoxydable et

ne constitue qu'un seul élément – évitant ainsi les soudures et diminuant le risque de corrosion.

Elaboration d'un corps de pompe en acier inoxydable hydroformé

En partant d'un flan circulaire, en acier inoxydable (d'une épaisseur de 1,5 mm à 3 mm, en fonction du modèle), les opérations suivantes permettent l'élaboration du corps :

- emboutissage pour donner au corps le volume nécessaire
- hydroformage du corps en spirale à l'aide d'une pression d'eau > 1000 bars
- perçage et fraisage des orifices
- soudage des accessoires et du support pour l'extérieur



Etapes de fabrication du corps : emboutissage profond, hydroformage, perçage et retouche, pose des accessoires.

8 Repoussage de métal pour des formes exclusives

Le repoussage de métal est un procédé de formage qui ne comporte aucune perte de métal. Il implique :

- un flan circulaire en métal ou un embouti préformé
- un galet de repoussage
- un mandrin monté sur un tour de symétrie circulaire

Le flan est déformé sur le mandrin par étapes, tandis que le mandrin et le flan sont entraînés par le tour. En raison des pressions élevées en présence, la lubrification est essentielle pour éviter l'adhérence de la pièce sur le mandrin, ce qui pourrait provoquer des endommagements de surface.

Ce procédé de repoussage au tour implique généralement moins d'investissements en capital, moins d'outillage, des coûts moindres de montage et de changement et il est moins gourmand en énergie que ne l'est le procédé d'emboutissage à la presse. Toutefois, comme sa productivité est faible,

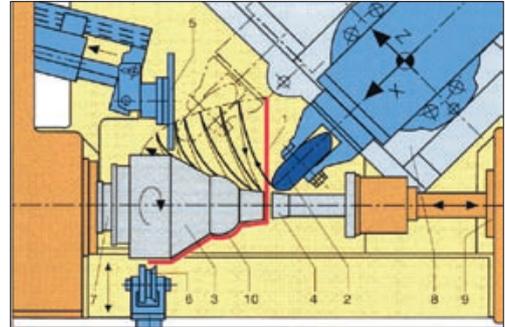
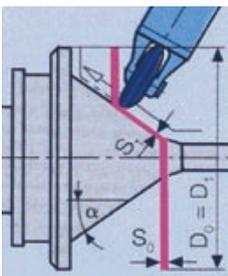


Diagramme : Leifeld Metal Spinning, Ahlen (D)

il convient plus au prototypage et aux petites séries. Le processus est mis en œuvre sans chercher à diminuer l'épaisseur du métal.

En alternative, on peut obtenir des formes coniques en une seule étape, à condition d'avoir un angle d'ouverture minimal d'environ 12° (ou moins, s'il y a plusieurs étapes). Le diamètre de l'extrémité ouverte du cône correspond au diamètre initial du disque, on amincit donc l'épaisseur de paroi (en fonction de l'angle). Ce procédé s'appelle fluotournage.

Diagramme : Leifeld Metal Spinning, Ahlen (D)



En alternative aux procédés conventionnels de formage, tel que l'emboutissage, le repoussage est idéal pour les formes coniques ou cylindriques. On retrouve ces formes très souvent dans les objets usuels de la vie courante et même dans l'industrie.

On peut obtenir des rapports élevés hauteur/diamètre, en partant juste d'un disque en acier inoxydable en deux dimensions

Photo: ThyssenKrupp Nirosta, Krefeld (D)



Repoussage au tour de l'acier inoxydable

La force exercée par l'outil induit des contraintes par compression dans le flan en acier inoxydable, ce qui conduit rapidement à un écoulement et limite la formabilité ultérieure. C'est pourquoi le repoussage n'est principalement utilisé qu'avec des épaisseurs limitées. Le procédé convient idéalement à des nuances avec une limite élastique faible et un taux d'écrouissage faible, ce qui est le cas des nuances ferritiques (par exemple EN 1.4016) et de certains aciers austénitiques (appelés austénitiques « stables ») à écoulement réduit, comme l'EN 1.4301 ou, à un degré supérieur, l'EN 1.4303.

Le repoussage au tour donne des formes en acier inoxydable avec un degré élevé de symétrie circulaire. En conséquence, le polissage post-fabrication de ces pièces peut généralement être effectué à moindre coût.

Un pied de tabouret très tendance en acier inoxydable

Un pied de tabouret est un produit à haute symétrie circulaire. Comme le pied du tabouret doit être suffisamment lourd pour apporter la stabilité, les métaux ferreux (acier doux ou inoxydable) conviennent mieux à cette pièce que l'aluminium, dont la densité est un tiers de celle des alliages en acier. Le pied étant une pièce qui nécessite de fréquents nettoyages, les pièces en acier peint ont tendance à ne pas résister longtemps : l'usage régulier des produits de nettoyage provoque l'écaillage de la peinture, ce qui n'est esthétiquement pas compatible avec du mobilier de haut de gamme.

La fabrication de pieds de tabouret par repoussage de métal en acier inoxydable s'est avérée une excellente alternative à ce problème. La haute symétrie circulaire des produits repoussés en acier inoxydable facilite le polissage ou l'avivage post-fabrication, comme le représente l'illustration du pied de tabouret.

La finition en une surface lisse, laminée à froid en acier inoxydable représente un coût de préparation très modique.



*Un tabouret de bar possède une symétrie circulaire haute. Le pied en acier inoxydable est résistant à tous produits de nettoyage agressifs.
Photo: Thate, Preetz (D)*



Photo: Thate, Preetz (D)

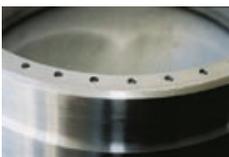
9 Jantes de roues décoratives par repoussage

Les propriétaires de voitures en quête d'originalité recherchent de plus en plus à personnaliser leurs véhicules à leur goût. Les jantes haut de gamme constituent l'expression de cette tendance. Le repoussage au tour étant un procédé de formage adapté aux petites séries, les jantes en acier inoxydable selon cette technique offrent les avantages suivants :

- rapport élevé résistance-poids (permettant des structures légères)
- résistance renforcée grâce à l'érouissage
- surface laminée à froid lisse, facilitant le polissage
- meilleure résistance à la corrosion que les matériaux métalliques traditionnels.
- absence de peinture de revêtement (qui peut s'écailler)



Assemblage d'une jante de roue de conception typique



Roue haut de gamme en trois parties : le moyeu en étoile (en haut), la jante intérieure (au milieu) et la jante extérieure (en bas). Cette dernière est en acier inoxydable, qui combine une résistance élevée à un faible poids et une surface lisse.

Les roues décoratives de voiture peuvent être fabriquées en deux ou trois éléments, en fonction du modèle. Un modèle en trois éléments se caractérise par :

- un moyeu en étoile (le plus souvent en aluminium moulé)
- une jante intérieure (généralement en aluminium moulé)
- une jante extérieure (susceptible d'être en acier inoxydable)

Le moyeu en étoile est boulonné à la jante intérieure grâce à la jante extérieure, à l'aide de boulons en alliage noble pour éviter une corrosion galvanique.

La jante extérieure en acier inoxydable est formée par repoussage au tour, suivi d'un polissage automatique. En plus d'apporter une surface visuellement attractive,



Assemblage du moyeu en étoile par la jante extérieure en acier inoxydable sur la jante intérieure.

le polissage renforce la résistance à la corrosion de cette pièce, qui sera exposée à des conditions atmosphériques variables, et éventuellement aux sels de déverglaçage.

Pour le fabricant, l'utilisation de l'acier inoxydable évite d'avoir à mettre en œuvre un traitement de surface final de la jante extérieure, bien peu respectueux de l'environnement.

Repoussage de la jante extérieure en acier inoxydable

On forme la jante extérieure à partir de flans circulaires en acier inoxydable. Ils peuvent être fournis directement par le fournisseur, ou découpés à partir d'ébauches carrées.

Pour faciliter la fabrication, les trous d'assemblages sont effectués avant que n'intervienne le repoussage. Le flan est monté sur un tour, contre un mandrin circulaire. Le galet de formage exerce une pression sur le flan qui adopte petit à petit la forme du mandrin. On ajoute progressivement plusieurs anneaux sur le tour, ce qui permet au flan d'être formé progressi-

vement. Il faut impérativement utiliser des lubrifiants adaptés.

Lors du formage à froid, l'acier inoxydable devient plus résistant (un phénomène également appelé écrouissage). S'il est trop amplifié, cet effet rend l'emboutissage difficile, mais l'écrouissage contribue bien plus que les propriétés de tout autre alliage traditionnel à la résistance mécanique de la jante extérieure, ce qui lui permettra de résister à des chocs avec des matériaux durs (trottoirs, pierres).



Repoussage au tour de la jante extérieure en acier inoxydable. La résistance mécanique de l'acier inoxydable va se renforcer lors du formage, procurant ainsi un potentiel intéressant pour absorber les chocs.

Résistance mécanique supérieure des roues en acier inoxydable

Les aciers inoxydables austénitiques disposent de propriétés mécaniques intéressantes. Non seulement ils possèdent déjà une résistance à la traction (R_m) élevée, mais les procédés par formage à froid comme le repoussage – plus le formage ultérieur du

bord de la jante extérieure – vont effectivement augmenter leur résistance mécanique. Tout en maintenant également les jantes à l'abri de tout dommage par une projection de graviers, cette caractéristique permet à l'acier inoxydable de constituer un matériau de choix pour un article de haut de gamme, sensible à un contact accidentel avec les routes pavées.



10 Profilés laminés à froid pour une résistance inégale



Le profilage constitue une méthode de fabrication bien connue pour obtenir des formes de métal allongées, souvent complexes à partir de feuillards en métal. Si le procédé est pris en compte au stade de la conception, on peut obtenir des réductions considérables en coûts de production, par exemple, en évitant des assemblages soudés de sous-sections en forme de C et/ou de U. Le profilage est une excellente façon de combiner plusieurs fonctions en un seul profilé : acheminement de câbles, refroidissement, fixation, etc.

Traditionnellement, le profilage est source de solutions pour l'industrie du bâtiment (encadrements de fenêtres et de portes), pour l'industrie des transports (camions, bus et tramways) et pour les secteurs de la construction mécanique et du mobilier de bureau. Mais d'autres secteurs (comme l'automobile) sont également en émergence, en raison de la capacité remarquable du profilage à la valeur ajoutée en intégrant différentes fonctions en un seul élément de construction.



Profilage de feuillards en acier inoxydable

Le procédé de profilage ressemble presque parfaitement au laminage de tubes. Une ligne d'unités de formage (chacune se composant de galets de formage trempés avec une forme usinée individuellement) transforme le feuillard (généralement en largeurs < 1000 mm) en un profilé qui peut être soudé en un profilé fermé ou laissé ouvert. L'acier inoxydable peut être formé de cette façon dans une plage d'épaisseur comprise entre 0,40 mm et 8 mm, pour exploiter graduellement sa capacité exceptionnelle à absorber une déformation plastique. Ce procédé graduel de formage renforce les propriétés mécaniques de l'acier inoxydable en permettant des profilés d'une résistance supérieure et d'une forme complexe.

Plus le nombre de phases de formage est élevé, plus graduelle est l'absorption de la déformation plastique et moins il y a de tension générée dans le matériau. Cela peut être important pour répondre aux critères de tolérance dimensionnelle lors de l'assemblage.

Valeur ajoutée pour un grand nombre d'applications finales

Pour ajouter de la valeur à un profilé, on peut compléter le procédé de laminage par des opérations comme :

- le perçage de points d'implantation
- le soudage de supports
- un cintrage ou un planage pour élaborer des profilés en trois dimensions



Profilés en acier inoxydable pour caisses d'autorails

Les autorails se composent traditionnellement d'un châssis et d'une carrosserie. La carrosserie est faite en matériaux comme de l'acier au carbone peint, de l'aluminium ou de l'acier inoxydable. Les composants en acier inoxydable peuvent être des profilés laminés à partir de feuillards d'une épaisseur variant de 0,40 mm à plus de 6 mm fournis par les laminiers.

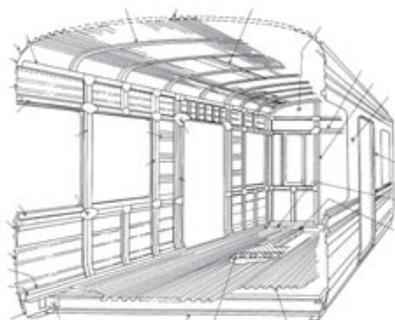


Illustration: Nickel Institute, Toronto (CDN)

Allègement potentiel pour les autorails en acier inoxydable

On peut utiliser la nuance 1.4301, mais le 1.4318 (avec ajout d'azote et moins de nickel) offre des propriétés mécaniques supérieures dès le départ. De plus, les propriétés mécaniques de cette nuance sont améliorées si le feuillard en acier inoxydable est renforcé (écroui) par les laminiers avant le laminage en profilés⁶. L'utilisation de l'acier inoxydable 1.4318 pour le profilage comporte donc un potentiel inégalé en économie de poids pour les montants, les poutres et les squelettes d'autorails.

Des carrosseries d'autorails plus légères consomment évidemment moins d'énergie lors de l'accélération et la décélération – un atout particulièrement évident pour les trains régionaux ou urbains qui s'arrêtent et démarrent fréquemment.

Un potentiel considérable en économie de poids est apporté par l'utilisation combinée de :

- l'acier inoxydable (au lieu de l'acier au carbone)
- la nuance 1.4318 (pour une résistance mécanique supérieure grâce à l'écrouissage)
- du profilage



Photo: ArcelorMittal Stainless Belgium, Genk (B)

Parmi les autres avantages de l'acier inoxydable pour les carrosseries d'autorails, on peut citer :

- peu d'entretien (il n'est pas nécessaire de peindre les carrosseries)
- durabilité (pas de perte d'épaisseur à long terme par l'usure)
- sécurité anti-incendie renforcée en comparaison d'autres métaux (légers)
- résistance aux chocs augmentée (en raison des propriétés mécaniques)



Photo: Outokumpu, Espoo (FIN)

⁶ Pour de plus amples informations, consulter le CD-ROM d'Euro Inox , *Stainless Steel for Structural Automotive Applications – Properties and Case Studies* (Automotive Series, Volume 1, Release 3), Luxembourg: 2006

11 Plaques d'échangeurs thermiques formées par explosion



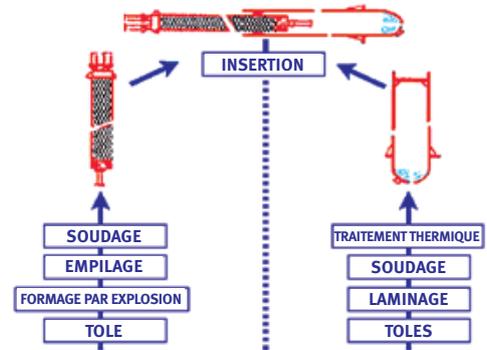
Le formage par explosion utilise la haute pression dynamique d'une onde de choc pour emboutir une tôle en métal à l'intérieur de la forme d'une matrice à haute vitesse. Le procédé est généralement mis en œuvre avec une charge d'explosif sous l'eau, à une certaine distance de la pièce à former. L'onde de choc agit comme un poinçon.

Comparés à des méthodes de formage plus traditionnelles, les avantages du formage par explosif permettent :

- le travail avec des dimensions importantes de tôles (grâce à l'utilisation d'explosifs)
- l'utilisation d'épaisseurs importantes de tôles (> 10 mm dans le cas des alliages de Ni)
- un éventail très étendu de formes (en réduisant les opérations comme le soudage et le traitement thermique)
- des produits à résistance mécanique élevée
- des dimensions d'une extrême précision

Echangeurs thermiques à grandes plaques

Les échangeurs thermiques à grandes plaques soudées se retrouvent généralement dans les raffineries de pétrole et dans l'industrie pétrochimique. Les critères imposés pour les échangeurs thermiques imposent une grande surface de contact, combinée à un transfert thermique à haute température. Si la surface de contact dépasse plusieurs milliers de mètres carrés, un simple appareil de cette dimension va s'avérer plus économique qu'un simple échangeur à faisceaux tubulaires.



Les échangeurs à plaques traditionnels se composent de centaines de tôles en acier inoxydable formées par explosion. Ces tôles ont une épaisseur entre 0,8 mm et 1,5 mm et peuvent avoir une largeur jusqu'à 2 m ainsi qu'une longueur jusqu'à 15 m. Après



le formage par explosion tôles par tôles, elles sont empilées et soudées ensemble. Les ondulations en forme de chevron des plaques créent une configuration d'écoulement des fluides de passage qui garantit un transfert thermique élevé.

L'assemblage est inséré dans une enceinte à pression conforme aux codes de construction de référence. Le raccord entre assemblage et enceinte se fait par des soufflets de dilatation.

Avantages de l'acier inoxydable

Le matériau procure divers avantages :

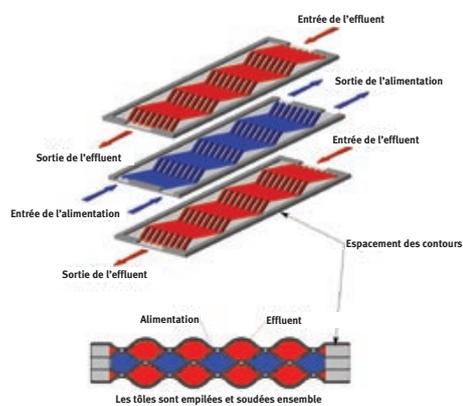
- Les températures habituelles du procédé en ETP s'établissent de 300 à 550 °C (avec un pic à 650 °C), ce qui ne constitue aucun problème pour les nuances comme EN 1.4541 (AISI 321).
- Les aciers inoxydables résistent à des pressions en service jusqu'à 120 bar et des différences de pression entrée/sortie de 40 bar.
- L'utilisation de vitesses de formage élevées (jusqu'à 120 m/s) pour le formage par explosion a un effet supplémentaire de durcissement par écrouissage sur tôles ondulées en acier inoxydable.
- La forme ondulée (qui provoque une turbulence) alliée à une faible rugosité de surface (non détériorée par le procédé de formage) limite le risque de colmatage (« encrassement ») et de faible rendement de l'échangeur thermique.
- La préconisation correcte de la nuance limite le risque de corrosion induit, par exemple, par des fractions de produits pétroliers contenant du soufre.
- On peut utiliser des techniques conventionnelles de soudage pour assurer l'étanchéité de piles de plaques.



Une combinaison réussie

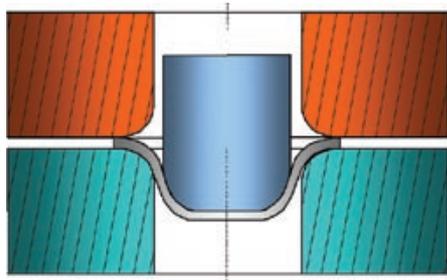
Ni le formage par explosion ni l'acier inoxydable ne sont qualifiés d'innovations. Mais le développement d'échangeurs thermiques à grandes plaques qui exploitent totalement les dimensions et les propriétés de l'acier inoxydable ainsi que le procédé de formage par explosion permettent de réduire les coûts dans le fonctionnement quotidien de l'industrie du raffinage, de la pétrochimie et du traitement du gaz.

Cette solution est bénéfique à la fois dans le cas d'un investissement de nouvelles unités qu'en renouvellement pour l'optimisation du processus.



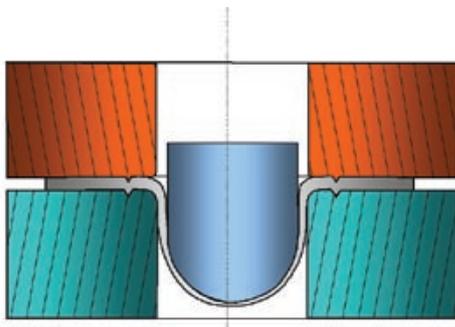
12 Cache-écrous par emboutissage profond pour la décoration de roues

Les aciers inoxydables présentent généralement d'excellentes propriétés d'emboutissage. Bien que la plupart des emboutis soit effectués avec de l'acier inoxydable austénitique (Cr-Ni), les nuances ferritiques (Cr) font également preuve de bonnes aptitudes pour certaines opérations de formage, à condition que le métal ne soit pas embouti par expansion. La différence entre emboutissage par retrait et par expansion est expliquée ci-dessous.



Emboutissage par retrait

- le métal s'écoule librement dans une matrice
- la déformation d'un grand cercle en un cylindre étroit doit venir de la largeur plutôt que de l'épaisseur (= forte anisotropie « r »⁷)



Emboutissage par expansion

- le métal est maintenu par le serre-flan
- une réduction considérable en épaisseur
- fort allongement (A %) et écrouissage (n) nécessaires

Dans la plupart des cas, on réalise un emboutissage mixte, ce qui explique le recours fréquent aux nuances austénitiques.

Capacité à l'emboutissage des nuances ferritiques

Les nuances ferritiques ont des valeurs LDR légèrement supérieures (voir page 8) à celles des nuances austénitiques, qui les rendent particulièrement bien adaptées à des applications d'emboutissage. L'effet « cordage » est traditionnel des nuances ferritiques. Néanmoins, des nuances ferritiques particulières sont disponibles : elles contiennent du titane ou du niobium et elles ont été fabriquées dans des conditions de laminage et de recuit strictes pour éviter l'effet cordage et améliorer les propriétés à l'emboutissage profond.



Cylindre en emboutissage profond en nuance ferritique traditionnelle EN 1.4016 (ci-dessus), montrant l'effet « cordage », et en nuance austénitique EN 1.4301 (ci-dessous). Le cordage est inesthétique et nécessiterait une finition post-fabrication. On peut l'éviter en sélectionnant une nuance ferritique « stabilisée » (comportant du Ti ou du Nb) et par un contrôle stricte des paramètres de laminage et de recuit.



⁷ L'anisotropie « r » est le rapport déformation transversale sur déformation en épaisseur. Si $r > 1$, la tôle s'allonge plus qu'elle ne s'amincit.

Cache-écrous emboutis pour automobile en acier inoxydable ferritique

De toutes les pièces en acier inoxydable utilisées pour enjoliver les automobiles et camions, le type de cache de fixation de roue représenté à droite constitue l'un des plus grands challenges dans l'emboutissage. La forme présente un degré élevé d'emboutissage, qui, dans ce cas, est réalisé par étapes successives.

L'acier inoxydable ne répond pas seulement à des critères esthétiques, mais il offre également une résistance mécanique élevée et une conception simple – l'article étant fait d'un seul élément qui ne nécessite ni soudage, ni collage. Traditionnellement, ces pièces ont été fabriquées en nuances austénitiques, comme EN 1.4301 (AISI 304). Les propriétés d'emboutissage des aciers inoxydables ferritiques sont telles que ces cache-écrous peuvent également être fabriqués à partir d'une nuance ferritique (EN 1.4526 – AISI 436) contenant du chrome, du molybdène et du niobium :

- Cette nuance convient pour le procédé d'emboutissage (anisotropie, cycle de production).
- Les nuances ferritiques, en général, présentent une combinaison de brillance et de couleur qui convient aux fabricants de baguettes de décoration automobile.
- Le molybdène contribue à la résistance à la corrosion par piqûres (par les sels de déverglaçage et les conditions météorologiques humides).
- Le niobium aide à supprimer l'effet cordage (en réduisant également de ce fait le polissage post-fabrication).

Comme elles sont petites, ces fixations conviennent de façon idéale au polissage en série dans des installations à tambours – ce qui donne à l'acier inoxydable un fini très brillant.

Les cache-écrous en acier inoxydable peuvent être collés, brasés ou soudés sur l'écrou. Ils sont plus résistants que des pièces en autres matériaux. L'acier inoxydable nécessite un traitement post-fabrication moindre (comme une peinture ou un revêtement) et est intégralement recyclable en fin de vie du véhicule.

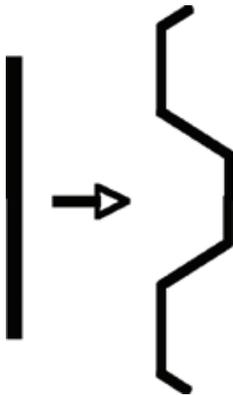


13 Tôle ondulée pour des capacités de fret plus importantes



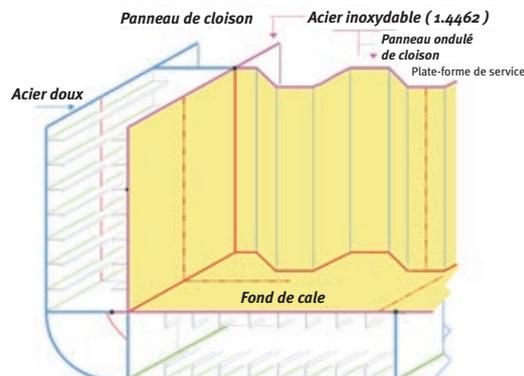
Photo : Lincoln Smitweld BV, Nijmegen (NL)

Les navires-citernes de produits chimiques transportent une grande variété de produits chimiques liquides. Parmi les frets traditionnels, on peut citer les produits chimiques, pétrochimiques et alimentaires, comme l'acide phosphorique, l'acide sulfurique, les produits pétroliers, les huiles végétales et les mélasses. Au port, le produit est pompé directement dans l'une des cuves du navire, qui peut être d'une capacité de plusieurs centaines de mètres cubes. Un tanker contient généralement plusieurs compartiments de ce type, de façon à ce que le navire puisse transporter de multiples frets.



Tôle ondulée en acier pour une rigidité renforcée

La rigidité d'un élément de structure est proportionnelle à son moment d'inertie. Ce dernier peut être renforcé en déplaçant la masse le plus possible à l'écart du centre de gravité, en faisant d'une tôle ondulée mince un élément de structure plus intéressant qu'une tôle plate plus épaisse. Une série de compartiments très larges avec des parois ondulées d'acier (« cloisons ») augmente la rigidité d'un navire, par exemple.



Plan : Lincoln Smitweld BV, Nijmegen (NL)



Photo: Outokumpu, Degerfors (S)

Les cloisons en panneaux ondulés sont également plus faciles à nettoyer, après chaque transport de fret, que les conceptions traditionnelles composées de raidisseurs internes.

Liquides corrosifs

Comme les navires constituent un investissement considérable, ils se doivent d'être les plus polyvalents possible. Les nuances austénitiques EN 1.4406 (AISI 316LN), EN 1.4434 (AISI 317LN) ou duplex EN 1.4462 sont généralement utilisées pour cette application, de façon à contenir des produits chimiques agressifs comme ceux mentionnés. Ces nuances Cr-Ni-Mo ne sont pas seulement résistantes à un plus grand nombre de produits corrosifs que les nuances Cr-Ni, mais elles permettent également des températures en service plus élevées, augmentant ainsi le confort en service du navire lors du chargement et/ou du déchargement.

Intégrité structurelle

La rigidité et la résistance à la corrosion sont des propriétés requises, mais elles ne suffisent pas pour répondre aux défis posés par la construction d'un bateau-citerne de 35 millions de dollars. Le stockage et le transport de produits chimiques sont soumis à des prescriptions sévères régissant la construction navale. Les critères de ruine, par exemple du platelage assurant le compartimentage, sont principalement associés à une mode de ruine par plastification, ce qui signifie que la limite d'élasticité ($R_{p0,2}$) du matériau de construction est un critère de choix déterminant.

A cet égard, les aciers inoxydables de type duplex présentent une limite d'élasticité nettement supérieure à celle des aciers inoxydables austénitiques, ce qui en fait un matériau privilégié pour les cloisons.

Ces aciers permettent un allègement de la structure ; ils autorisent dès lors une plus grande capacité de chargement, ce qui constitue un aspect de toute première importance pour le transport de fret.



Photo : Lincoln Smitweld BV, Nijmegen (NL)



Photo : Cantiere Navale De Poli, Venice (I)

Les multiples avantages de l'acier inoxydable duplex

En premier lieu, les aciers inoxydables duplex possèdent, à un degré élevé, les mêmes propriétés uniques de formage que présentent les aciers inoxydables austénitiques : propriétés qui conviennent totalement aux structures ondulées qui augmentent la rigidité d'un compartiment de citernier. De plus, la limite élastique élevée des aciers inoxydables duplex constitue un potentiel considérable pour l'allègement, tout en permettant de diminuer les épaisseurs de paroi en respectant les critères de structure de la construction navale.

Enfin, la combinaison du chrome, molybdène et d'azote rend cette famille de nuances particulièrement résistante à la corrosion localisée, comme la corrosion par piqûres et caverneuse. Cela augmente le nombre de produits chimiques différents (avec leurs diverses plages de températures) qu'un navire peut transporter, pour, au final, étendre la base de clients potentiels pour ce type de biens d'investissements.

14 Références

- [1] DE MEESTER, Paul, *Kwaliteitscontrole en mechanische eigenschappen van materialen*, 2^e éd., Louvain : Acco, 1988
- [2] LAGNEBORG, Rune, « Not only stainless but also an interesting structural material », *Stainless steel for structural automotive applications – Properties and case studies* (Automotive Series, Volume 1, CD-ROM), 3^e éd., Luxembourg : Euro Inox, 2006
- [3] *Stainless steel for structural automotive applications – Properties and case studies* (Automotive Series, Volume 1, CD-ROM), 3^e éd., Luxembourg : Euro Inox, 2006, « Forming » chapter
- [4] « Deformazione plastica a freddo dell'acciaio inossidabile », *Inossidabile 154*, Milan: Centro Inox, 2003
- [5] *Handbook « Spinning and shear forming »*, 2^e éd., Ahlen : Leifeld Metal Spinning, 2002
- [6] *Thate gedrückte Präzision*, Preetz: Thate, 2005
- [7] « Rolvormprofilieren (koudwalsen) », *Roestvast Staal 3/2005*, Leiden: TCM, 2005
- [8] NEESSEN, Fred; BANDSMA, Piet, « Tankers – A composition in duplex stainless », *Welding Innovation, Volume XVIII, No. 3*, Cleveland: The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 2001
- [9] « Visit to De Poli shipyard in Venice, Italy », *IMOA Newsletter January 2001*, Londres: International Molybdenum Association, 2001

ISBN 978-2-87997-212-1