brouillard d'eau, à la corrosion dans les fissures et à la corrosion fissurante sous tension, ainsi éventuellement de l'examen de la corrosion intercristalline. Ces tests de laboratoire servent à vérifier la résistance à la corrosion d'une matière donnée, sous des conditions de corrosion définies (fluide, concentration, température, contrainte, etc.).
Depuis peu, des appareils sont disponibles avec lesquels la résistance relative à la corrosion peut être examinée sans destruction sur la pièce terminée, par ex. pour la vérification des cordons de soudure.

4.4 Examens structurels

Ces méthodes permettent d'examiner la macrostructure et la microstructure d'un matériau.

4.4.1 Macrostructure (examen non destructif)

Ces procédés servent au contrôle de défauts éventuels internes et externes des pièces, sans les endommager ni les détruire.

Défauts de surface

Ces procédés sont utilisés le plus souvent sur des pièces terminées ou presque pour la détection de défauts qui s'étendent jusqu'à leur surface, comme par ex. des fissures. Les procédés utilisés à cet effet sont:

- Poudre magnétique (ne convient que pour des matériaux magnétisables): dans ce procédé, la pièce est pulvérisée au moyen d'un liquide fluorescent magnétisable, puis magnétisée. Des défauts en surface conduisent à des perturbations des lignes de champ magnétiques et à un enrichissement de liquide en ces endroits. En les examinant à la lumière UV, ces défauts sont bien visibles.
- Ressuage (convient pour tous les matériaux): la pièce est pulvérisée avec un liquide rouge qui pénètre dans les défauts en raison de sa grande capacité de pénétration. Après un moment d'attente, le liquide est essuyé et la surface est recouverte par un spray d'un «révélateur» blanc qui aspire la couleur restée dans les défauts et les rend ainsi visibles.

Défauts internes

Pour détecter des défauts qui ne s'étendent pas jusqu'à la surface (criques, grandes inclusions, défauts de soudure, grands pores), on applique les méthodes suivantes:

- Ultrasons (procédé utilisable pour tous les matériaux présentant une surface relativement lisse): la pièce est exposée à des ultrasons de l'ordre de grandeur de quelques 100 kHz à quelques MHz. Le son est réfléchi aux endroits des défauts. L'écho est affiché sur un écran. Le procédé convient bien pour un emploi mobile, mais une interprétation correcte exige cependant une certaine expérience.
- Examen aux rayons X, isotopiques ou gamma: l'affichage se faisant sur film, ces procédés seront utilisés si le résultat doit être conservé durablement. Ils sont toutefois limités à des épaisseurs de matière jusqu'à 150 mm. En raison de la nécessité d'équipements de protection contre les radiations, ces procédés sont coûteux et nécessitent en conséquence des spécialistes. Des applications mobiles sont possibles.
- Tomographie par ordinateur: ce procédé connu en médecine permet la représentation en 3 dimensions des défauts. Les inconvénients en sont un appareillage complexe ainsi que la nécessité d'équipements de protection et en conséquence de spécialistes.

4.4.2 Structure fine et microstructure

Pour l'examen de la structure fine et de la microstructure, on utilise des méthodes métallographiques en relation avec des microscopes optiques ou électroniques. Ces méthodes sont utilisées d'une part dans la recherche fondamentale et le développement, et d'autre part, elles servent aussi à l'éclaircissement de défauts (par ex. défauts de traitement thermique ou de structure) et de dégâts ainsi que de leurs causes.

5 MISE EN FORME ET USINAGE

5.1 Principes généraux de mise en forme et d'usinage

Les aciers inoxydables présentent en raison de leur part d'alliage élevée en chrome, nickel et molybdène des caractéristiques de mise en forme et d'usinage qui se différencient nettement de celles des aciers faiblement alliés et qu'il s'agit de prendre en considération pour un emploi fructueux de ces matériaux. Les aciers inoxydables sont le plus souvent mis en forme à l'état de livraison.
La mise en forme des aciers inoxydables doit être absolument séparée de celle des aciers non alliés, ce qu'on appelle la "séparation noir/blanc". Sinon il existe un grand risque que la surface de l'acier inoxydable soit souillée par des particules de fer, ce qui conduit inévitablement à la rouille erratique. Cette séparation ne s'applique pas aux seuls locaux, mais aussi aux outils utilisés. Egalement pour le stockage et le transport des aciers inoxydables, tout contact avec des aciers non alliés doit être évité (bandes d'acier pour la fixation, supports en fer non protégés, etc.).

5.2 Mise en forme par formage

5.2.1 Formage à chaud

Un formage à chaud est possible pour tous les aciers inoxydables. En raison de leur mauvaise conductibilité thermique, l'échauffement doit se faire lentement jusqu'à env. 800–850 °C, au-dessus, il peut avoir lieu rapidement.
Les aciers ferritiques sont très tendres aux températures usuelles de formage et tendent à la "formation de fentes" ainsi qu'à une croissance rapide du grain, ce qui ne peut être empêché que par une forte déformation. Les pièces en acier ferritique sont le plus souvent refroidies à l'air libre.
Le formage à chaud des aciers martensitiques ne pose en général pas de problème, si l'on tient compte au chauffage et au refroidissement du comportement au changement de structure. Afin de réduire le risque de fissuration des aciers martensitiques, il faut éviter un refroidissement trop rapide.
Les matières austénitiques devraient être chauffées régulièrement. L'atmosphère ne doit pas contenir de soufre ni avoir une action carburante. Ceci est particulièrement important pour les sortes à haute teneur en nickel. Les pièces d'une section de plus de 3 mm sont trempées à l'eau.
Pour obtenir des propriétés optimales du matériau, les pièces formées à chaud devraient être soumises à un traitement thermique ultérieur. Les températures de traitement correspondantes sont indiquées dans le tableau 7.6.

5.2.2 Formage à froid

Les procédés les plus usuels de formage à froid sont le laminage, le matriçage, le pliage et l'emboutissage. En principe, tous les aciers inoxydables conviennent au formage à froid. Le degré de déformation admissible est cependant spécifique à la matière, de même que l'écrouissage qui en résulte.

© KOHLER 2016

Ceci est très marqué pour les aciers austénitiques. Dans le cas d'une très forte déformation, il est donc nécessaire de prévoir entre les diverses étapes de déformation un recuit intermédiaire à 1000 °C environ. Une fois le formage terminé, il faudrait procéder à un recuit à 1050 °C suivi d'une trempe à l'eau. Les modifications de propriétés dues à la déformation à froid sont ainsi annulées et les caractéristiques normales de la matière rétablies. Dans de nombreux cas, un écrouissage est cependant souhaité, par ex. pour les fils et bandes en dureté de ressort. Une augmentation extrême de la résistance peut cependant nuire à la résistance à la corrosion et rendre l'acier légèrement magnétique. Si nécessaire, ces effets peuvent être annulés par un recuit de mise en solution. Lors du pliage des aciers inoxydables, il faut tenir compte qu'ils ont un effet de ressort plus important que les aciers au carbone. Sur les aciers ferritiques, la déformation à froid est rendue plus difficile par leur sensibilité à l'entaille. Un chauffage à env. 100–200°C améliore notablement la capacité de déformation. Sur les aciers martensitiques, une déformation à froid doit avoir lieu avant la trempe.

5.3 Usinage par enlèvement de copeaux

5.3.1 Usinage par enlèvement de copeaux des aciers inoxydables

En raison de leurs caractéristiques différentes, les aciers inoxydables présentent d'autres caractéristiques d'usinage que les aciers ordinaires au carbone. On peut dire en général que l'usinage devient plus difficile quand la teneur en éléments d'alliage augmente, c'est-à-dire qu'il faut choisir pour chaque groupe d'alliage des données d'usinage différentes. Les caractéristiques spéciales des aciers inoxydables influencent tous les quatre facteurs d'usinage, soit la force de coupe, l'usure de l'outil, la forme du copeau et la finition de surface.

Les caractéristiques spéciales suivantes des aciers inoxydables, entre autres les austénitiques, doivent être prises en considération lors de leur usinage:

- tendance marquée à l'écrouissage: lors de passes successives, l'outil rencontre une surface nettement plus dure qu'à la première passe, ce qui entraîne une augmentation de la force de coupe. Cela peut conduire à des problèmes lors de la finition en raison de la faible profondeur de coupe.
- basse conductibilité thermique: ce fait conduit à une plus forte charge thermique du tranchant des outils.
- forte ténacité: les efforts de coupe plus élevés entraîne une plus grande charge thermique des outils.
- encrassement, grippage: les aciers fortement alliés ont tendance à former des arêtes rapportées, qui conduisent à une mauvaise qualité de surface ainsi qu'à une sollicitation supplémentaire des arêtes des outils.
- de mauvaises propriétés de bris des copeaux conduisent à la formation de longs copeaux en boucles qui ne se laissent que difficilement enlever de l'outil et qui empêchent de laisser la machine travailler sans surveillance (voir aussi chap. 5.3.3).

5.3.2 Principes généraux de l'usinage

Les principes suivants doivent être respectés lors de l'usinage des aciers inoxydables.

- Pour éviter des vibrations (broutage), seules des machines de construction rigide doivent être utilisées, d'une puissance jusqu'à 50% supérieure à ce qui est nécessaire pour l'usinage des aciers au carbone.
- Les outils et les pièces doivent être serrés solidement.
- Les outils doivent être fixés le plus court possible et être affûtés ou remplacés assez tôt.
- Les aciers inoxydables présentant une plus basse conductibilité thermique que les aciers au carbone, il faut assurer un refroidissement suffisant avec un réfrigérant approprié. Sinon des dégâts dus à la surchauffe sont inévitables tant sur l'outil que sur la pièce.
- Les aciers inoxydables tendent à durcir en cours d'usinage. La profondeur de coupe doit donc être choisie de façon que la couche durcie de la passe précédente soit enlevée sûrement.
- Des coupes interrompues doivent être évitées autant que possible, car elles conduisent à un écrouissage supplémentaire.
- Les fournisseurs ou les fabricants de liquides de coupe et de refroidissement renseignent sur le choix adéquat

5.3.3 Usinabilité

Aciers ferritiques

Ceux-ci ont tendance à l'encrassement et il peut donc être avantageux d'augmenter leur résistance à environ 200 HB.

Aciers martensitiques

Ils présentent des caractéristiques d'usinage analogues à celles des aciers de construction ordinaires. L'usinage par enlèvement de copeaux se fait le plus souvent à l'état non trempé.

Aciers austénitiques de fabrication conventionnelle

Ils présentent en conséquence de leur grande ténacité et de leur teneur élevée en Ni une tendance marquée au soudage à froid et à l'écrouissage. Comme ils tendent en outre à former de longs copeaux en boucles, leur usinage par enlèvement de copeaux est nettement plus difficile que celui des aciers faiblement alliés. Pour empêcher la formation d'arêtes rapportées et pour réduire l'écrouissage, on travail avec de basses vitesses de coupe et de fortes avances. Un refroidissement suffisant est alors très important.

Aciers de décolletage

Comme on l'a déjà mentionné, les aciers inoxydables austénitiques sont en raison de leur teneur élevée en Ni entre autres, plus difficiles à usiner que les aciers au carbone ordinaires. De manière analogue aux aciers de décolletage faiblement alliés, les aciers de décolletage inoxydables sont alliés au soufre (jusqu'à 0.35%). Ce dernier forme du sulfure de manganèse dur et fragile qui sert de brise-copeaux de telle sorte que seuls des copeaux courts se produisent, comme c'est souhaité pour le décolletage. Ces aciers sont donc principalement utilisés dans le domaine du décolletage. Mais le soufre influence cependant négativement d'autres propriétés, comme:

- les aciers de décolletage ne sont pas soudables
- risque de rupture fragile lors de la déformation à froid
- réduction de la résistance à la corrosion
- les aciers de décolletage (même sans teneur accrue en soufre, voir chap. 5.3.4) sont difficiles à polir et ne se prêtent pas au polissage électrolytique)

© KOHLER 2016

5.3.4 Aciers inoxydables à usinabilité améliorée sans teneur accrue en soufre

Les inconvénients cités plus haut des aciers de décolletage alliés au soufre ont conduit au développement d'aciers inoxydables sans teneur accrue en soufre (par ex. les qualité PRODEC ou VALIMA). Dans ces aciers, on réalise grâce à une métallurgie particulière de fusion par addition de poudre de calcium et de silicium des oxydes de CaSiAl et des sulfures de CaMn fins, tendres, arrondis et répartis régulièrement.

Les avantages de ces aciers sont:

- des caractéristiques optimales d'usinage par coupe
- le choix de paramètres de coupe plus performants
- la plus longue durée de coupe des outils en raison de l'effet lubrifiant et de la dureté plus basse des inclusions brise-copeaux
- ainsi moins d'interruptions de production et des temps de production plus courts
- réduction des frais de production
- pas de diminution de la résistance à la corrosion et de la soudabilité
- capacité concurrentielle accrue

5.4 Polissage

5.4.1 Polissage des divers groupes d'acier

Une surface parfaitement polie ne peut s'obtenir sur des pièces d'acier inoxydable que par l'emploi d'alliages non stabilisés. Les aciers stabilisés au Ti ou au Ta/Nb (par ex. 1.4541 et 1.4571) forment des carbures durs inclus dans une matrice plus tendre de ferrite ou d'austénite. Lors du polissage brillant, ces particules dures sont soit moins enlevées et font saillie, soit arrachées en laissant des empreintes en queues de comètes. Les sortes martensitiques (par ex. 1.4034) ne peuvent être parfaitement polies qu'à l'état trempé.
Tant lors du meulage que du polissage des aciers austénitiques, il faut tenir compte de la plus faible conductibilité thermique et du plus grand coefficient de dilatation. En cas de trop fortes vitesses de meulage ou de trop fortes pressions d'appui, il peut se produire des accumulations de chaleur et des colorations.

5.4.2 Polissage mécanique

La condition nécessaire à un excellent résultat du polissage est une surface exempte de griffures, d'endommagements mécaniques et de défauts, c'est-à-dire que la surface doit avoir été parfaitement meulée avec un grain de 400 au moins. Un meulage trop grossier ne peut pas être corrigé par le polissage. De petits sillons, stries ou inégalités sont cependant égalisés et remplis. Pour les diverses étapes du polissage, on utilise des disques de polissage de diverses matières, comme les brosses de fibres, de cordes de sisal, des disques de sisal imprégnés, des disques de coton durs ou tendres.
Pour le polissage des aciers inoxydables, on emploie diverses pâtes à polir, comme de l'argile fondue («chaux de Vienne», tendre) ou de l'oxyde de chrome («vert de chrome», dur).

5.4.3 Polissage électrochimique

On entend par polissage électrochimique un traitement électrochimique qui conduit à une égalisation et au brillant d'une surface à l'origine mate et rugueuse. Il s'agit en principe d'une inversion du procédé galvanique, où la pièce à traiter se trouve au pôle positif (anode) d'une source de courant continu. La caractéristique décisive du procédé est un enlèvement préférentiel des pointes de rugosité, qui conduit d'abord à une réduction de la micro-rugosité et à la suite de la prolongation de la durée de traitement, aussi à une élimination de la macro-rugosité. Le polissage électrolytique des aciers inoxydables conduit en outre à une passivation de la surface, ce qui a une répercussion positive sur le comportement à la corrosion.
En principe, tous les aciers inoxydables peuvent être soumis au polissage électrolytique, indépendamment de leur composition d'alliage et de leur caractéristiques mécaniques. Pour un résultat satisfaisant, les conditions suivantes doivent toutefois être remplies:

- structure la plus fine, régulière et homogène possible, avec le moins possible d'inclusions non métalliques et d'autres défauts
- bonne conductibilité électrique
- comportement de dissolution anodique identique des divers composants de l'alliage
- aucun composant d'alliage résistant électrochimiquement
- structure identique des parties ajoutés, par exemple parties soudées
- épaisseur de couche suffisante des matières plaquées

Dans la pratique, cela signifie que les aciers stabilisés au Nb ou au Ti (par ex. 1.4541, 1.4571) ou les aciers de décolletage (par ex. 1.4305) ne conviennent que sous conditions ou pas du tout au polissage électrolytique. Des inclusions non métalliques auxquelles il faut toujours s'attendre avec les aciers produits en gros sont attaquées plus ou moins fortement que la matrice et sont donc visibles après le polissage électrolytique. Dans les aciers de décolletage cependant, indépendamment de leur mode de production, des inclusions sont produites intentionnellement comme brise-copeaux. Les aciers de décolletage ne peuvent donc pas permettre un polissage électrolytique satisfaisant.
Un acier qui doit fournir d'excellents résultats au polissage électrolytique doit être très pur, c'est-à-dire produit par un procédé spécialement pur, au moyen de ferrailles spécialement pures:

[S] < 0.005% (EN 10088-3: [S] < 0.030%)
[P] < 0.010% (EN 10088-3: [P] < 0.045%)

Les aciers présentant de si basses teneurs en soufre et en phosphore doivent être produits par un procédé particulier dans une charge spéciale.

5.5 Soudage

5.5.1 Généralités

Lors du soudage d'aciers inoxydables, il est important de limiter l'apport de chaleur afin de garder aussi petites que possibles les zones influencées par la chaleur (ZIC). Des procédés automatiques tels que le soudage MIG et WIG sont avantageux dans ce cas.
Des assemblages soudés d'aciers inoxydables avec des aciers non alliés sont parfaitement possibles, mais il faut toutefois absolument tenir compte du problème d'une éventuelle corrosion de contact.
Des indications pour le calcul des indices de ferrite ainsi qu'un diagramme de Schaeffler se trouvent au chapitre 7.

© KOHLER 2016

HANS KOHLER SA, Claridenstrasse 20, case postale, CH-8022 Zurich, téléphone 044 207 11 11, fax 044 207 11 10

5.5.2 Procédés de soudage

Les procédés de soudage les plus courants pour les aciers inoxydables sont:

– soudage manuel à l'arc électrique
– soudage WIG / TIG
– soudage MIG / MAG

D'autres procédés pour des applications spéciales, que nous ne traiterons pas en détail, sont:

– soudage sous poudre
– soudage électrique sous laitier
– soudage au plasma
– soudage au laser
– soudage par faisceau d'électrons (sous vide)
– soudage de grande puissance

Soudage à l'arc électrique
Le soudage à l'arc électrique avec une électrode enrobée est le procédé le plus simple et le plus répandu. La source de chaleur efficace (température de l'arc de 6000°C environ), la simplicité de la méthode et l'application dans n'importe quelle position soutiennent ce procédé. Cette méthode est utilisée pour des épaisseurs de matière de plus de 1 mm.

Soudage WIG / TIG
(**W**olfram/**T**ungsten **I**nert **G**as)
Dans ce procédé, la chaleur nécessaire est produite par un arc électrique allumé entre une électrode de tungstène qui ne fond pas et la pièce. On utilise comme gaz protecteur de préférence de l'argon pur ou de l'argon avec une addition d'un pour cent d'hydrogène. Des tôles jusqu'à une épaisseur de matière de 2 mm peuvent être soudées sans métal d'apport. Pour de plus fortes épaisseurs de tôle, on utilise un fil de métal d'apport.

Soudage MIG / MAG
(**M**etal **I**nert/**A**ctive **G**as)
L'arc est ici allumé entre le métal d'apport (fil) et la pièce. On travaille dans le procédé MIG avec des mélanges inertes hélium-argon, alors que dans le procédé MAG, on a recours à des mélanges réactifs hélium-argon-gaz carbonique. Ce procédé se recommande pour des épaisseurs de matière de plus de 5 mm.

5.5.3 Soudabilité des divers aciers inoxydables

Aciers ferritiques
Les aciers ferritiques ne présentent aucun changement de structure. Ils ne sont donc pas trempants ou que sous conditions. Cela facilite le soudage en comparaison des aciers martensitiques. Les aciers ferritiques ont cependant tendance au grossissement du grain, qui conduit à une fragilisation, c'est-à-dire à une ténacité réduite après le soudage.
Il est donc recommandé de préchauffer les pièces avant le soudage à 200°C environ et ensuite de les recuire à 750°C. On utilise comme métal d'apport des matériaux ferritiques, ferrito-austénitiques ou austénitiques. Si les possibilités de préchauffer ou de recuire les pièces ne sont pas offertes, il faut utiliser un métal d'apport austénitique.

Aciers martensitiques
En raison de leur teneur élevée en C, ces aciers présentent au refroidissement depuis la température de soudage un changement de structure et tendent à se fissurer par trempe. C'est uniquement en prenant des précautions particulières que la formation de fissures peut être évitée. Un préchauffage de la pièce avant le soudage à 200–300 °C et ensuite un recuit à 700–750 °C sont recommandés. Pour les aciers qui présentent une teneur en C de plus de 0.30 %, il faudrait déconseiller le soudage.

Aciers austénitiques
Les aciers austénitiques sont très bien soudables. Comme on l'a déjà mentionné au chapitre «Corrosion», il faut tenir compte du risque de précipitation de carbures aux joints des grains et de la corrosion intercristalline.
Les aciers austénitiques présentent un coefficient élevé de dilatation ou mieux dit de rétraction. Il faut prendre ce phénomène en considération pour le pré-soudage (agrafage) de grandes constructions en acier inoxydable; sinon il faut s'attendre à ce que la construction se déforme massivement.

Aciers austéno-ferritiques (Duplex)
Ces aciers se situent quant à leur soudabilité entre les matériaux ferritiques et austénitiques. Si ces aciers sont soumis lors du soudage à un échauffement prolongé dans le domaine de 650–850 °C, il se produit une précipitation intermétallique, dite «phase sigma», qui entraîne une réduction de la ténacité. Par un recuit de recristallisation à 950–1000 °C, la phase sigma peut de nouveau être dissoute et la matière peut être régénérée à sa ténacité normale. Pour le soudage, on utilise comme métal d'apport des matériaux austénitiques ou ferrito-austénitiques.

5.5.4 Couleur de revenu et défauts de soudure

Comme on l'a déjà mentionné au chapitre 2.3, les aciers inoxydables se protègent par la formation d'une couche d'oxyde de chrome très résistante et stable (couche passive).
Des couleurs de revenu se produisent lors de traitement thermiques ou du soudage sans protection suffisante contre l'oxydation, par réaction de l'acier avec l'oxygène résiduel adhérent à la surface. La couche passive est alors détruite et remplacée par une nouvelle couche ayant en principe une autre constitution et entre autres aucun effet protecteur. La structure de cette nouvelle couche et ainsi également sa résistance à la corrosion dépendent en premier lieu de la température maximale atteinte ainsi que de l'évolution de la température en fonction du temps.
Il ressort d'essais de corrosion correspondants que les couleurs de revenu ne sont aucunement des couches passives et qu'elles réduisent notablement la résistance locale à la corrosion. Les couleurs de revenu doivent donc être soit empêchées par des mesures appropriées (par ex. à l'intérieur de tubes soudés par activation) soit éliminées complètement après-coup, afin que la couche passive puisse se former avec la résistance à la corrosion d'origine aussi dans la zone du cordon de soudure.
Des défauts de soudure aussi peuvent réduire localement la résistance à la corrosion et ils doivent donc être éliminé complètement. On trouve par exemple parmi les défauts de soudure:

– des fusions incomplètes
– des cratères de brûlure
– des pores
– des inclusions de laitier
– des cratères d'amorçage

Les défauts de soudure doivent être éliminés par meulage et / ou par des soudures de réparation.

© KOHLER 2016

5.5.5 Traitements après le soudage

Afin que les aciers inoxydables puissent former une couche passive parfaite, ils doivent présenter une surface propre et régulière. Toute espèce d'impureté, comme par exemple des empreintes de doigts, des traces de craie, de graisse ou d'huile ou des restes de couleurs de revenu empêche l'accès de l'oxygène à la surface et ainsi la formation de la couche passive.
L'étendue et la méthode du traitement sont définies par la résistance exigée à la corrosion et par la qualité de surface, ainsi que par les possibilités offertes. Une construction correcte ainsi que de bons processus de planification et de fabrication réduisent le besoin de traitement et ainsi également les frais.
Il existe des processus de nettoyage mécaniques et chimiques, qui peuvent être appliqués séparément ou en combinaison selon les exigences.

Méthodes mécaniques de traitement

MEULAGE
Le meulage est habituellement la seule méthode pour éliminer les défauts de soudure et les griffures profondes. Une meule à lamelles suffit pour enlever les couleurs de revenu et les impuretés.
Il y a lieu d'observer ce qui suit:

- utiliser des meules auto-affûteuses exemptes de fer, qui sont utilisées exclusivement pour le meulage d'aciers inoxydables
- ne jamais utiliser un abrasif qui a été utilisé auparavant pour de l'acier non allié
- éviter un grain trop grossier: meulage grossier avec K40–K60, puis meulage fin avec K180 ou plus fin
- pour les hautes exigences, un polissage peut être nécessaire
- ne pas surchauffer la surface par une trop forte pression de meulage, afin d'éviter des fissures de meulage et des colorations
- les défauts doivent être éliminés complètement
- rugosité de surface: les cordons de soudure et les surfaces qui ont été meulées ou grenaillées trop grossièrement favorisent les dépôts. Le risque d'une corrosion et de la contamination d'un produit augmente. Un meulage grossier conduit à de trop fortes tensions de traction dans la surface. Le risque de corrosion fissurante sous tension et de corrosion par piqûres est fortement augmenté. Pour une série d'applications, il existe en outre des prescriptions sur la rugosité de surface maximale admissible (valeurs R_a).

GRENAILLAGE
Le grenaillage avec des billes de verre ou d'acier convient pour éliminer les impuretés d'oxydes de chauffage et de fer. Les billes doivent cependant être complètement propres, c'est-à-dire qu'elles ne doivent pas avoir été utilisées auparavant pour de l'acier non allié. La rugosité de la surface représente le facteur de limitation de cette méthode. Avec peu de pression et un faible angle d'incidence, on peut obtenir de bons résultats. Le grenaillage avec des billes de verre fournit pour l'élimination de la couleur de revenu une meilleure qualité de surface que le meulage.
Lors du grenaillage, il se produit des contraintes supplémentaires de compression en surface, qui au contraire des contraintes de traction ont une action positive sur la résistance à la corrosion fissurante sous tension et à la fatigue.

BROSSAGE
Pour ce traitement, il ne faut utiliser que des brosses en acier inoxydable ou en matière plastique. Cette méthode n'attaque que peu la surface: la couleur de revenu est bien enlevée, mais il n'y a aucune garantie de l'élimination de la couche appauvrie en chrome.

Méthodes chimiques de traitement
Les méthodes chimiques permettent d'enlever les oxydes produits par l'action des hautes températures ainsi que les impuretés de fer, sans attaquer notablement la surface. Les produits chimiques éliminent la couche en surface par une corrosion contrôlée. Ils enlèvent sélectivement les zones de la surface les moins résistantes à la corrosion, comme les couleurs de revenu et la couche appauvrie en chrome, et ils permettent ainsi la formation d'une couche passive résistante. Un traitement par des moyens chimiques doit donc être préférée en raison de la rugosité de surface nettement plus fine qui résulte d'un traitement grossier seulement mécanique.

Lors de procédés chimiques, il faut respecter absolument les prescriptions correspondantes de protection de l'environnement (voir aussi *chapitre* «Neutralisation / Elimination»). Cela nécessite des locaux de décapage équipés en conséquence et éventuellement une protection adéquate des personnes (vêtement de protection, masque respiratoire).

DECAPAGE
C'est la méthode chimique la plus fréquemment utilisée pour enlever la couleur de revenu et les impuretés de fer. On utilise normalement pour le décapage les mélanges d'acides suivants:

8–20% d'acide nitrique (HNO_3)
0.5–5% d'acide fluorhydrique (HF)
reste: eau

Les solutions chlorées comme l'acide chlorhydrique (HCl) ne doivent pas être utilisées en raison du risque de corrosion par piqûres!

Aptitude au décapage des diverses matières:

matière	C max. [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	aptitude au décapage
1.4301	0.07	18.3	9.3	–	1
1.4306	0.030	19.0	11.0	–	1
1.4307	0.030	18.5	9.0	–	1
1.4404	0.030	17.5	11.5	2.2	2
1.4571	0.08	17.5	12.0	2.2	2
1.4432	0.030	17.5	11.5	2.7	2
1.4435	0.030	18.0	13.7	2.7	2
1.4462	0.030	22.0	5.5	3.0	3
1.4439	0.030	17.5	13.5	4.5	3
1.4539	0.020	20.0	25.0	4.5	3
254 SMO	0.020	20.0	18.0	6.5	4
654 SMO	0.020	24.0	22.0	7.3	pas apte

Aptitude au décapage: 1 = très facile, ... 4 = très difficile

Les facteurs suivants sont important pour un décapage efficace:

- Surfaces: elles doivent être exemptes d'impuretés organiques.

© KOHLER 2016

– Température: l'action de la solution décapante augmente fortement avec la température; la vitesse de décapage s'en trouve notablement augmentée. La température devrait se situer entre 25 °C et 65 °C au maximum.
– Mélange d'acides: composition, concentration et teneur en ions métalliques libres.
– Sortes d'acier: des matières fortement alliées, résistantes à la corrosion, exigent un mélange d'acides agressif et / ou une température du bain plus élevée.
– Genre et épaisseur de la couche d'oxydes: celle-ci dépend dans une grande mesure de la méthode de soudage. Selon l'apport de chaleur, il se forme divers oxydes au soudage. Avec l'utilisation d'un gaz protecteur, la formation d'oxyde est la plus réduite.
– Caractéristiques de surface: une surface grossière, laminée à chaud, peut être plus difficile à décaper qu'une surface lisse laminée à froid ou rectifiée.

METHODES DE DECAPAGE
– Bain de décapage:
Le décapage au bain est une méthode commode pour autant que les dimensions de la pièce le permettent. Avec de trop fortes températures, il peut se produire pour des aciers faiblement ou fortement alliés un décapage excessif, ce qui a pour conséquence une surface rugueuse. L'effet de décapage dépend non seulement de la concentration de l'acide et de la température, mais aussi de la teneur en ions métalliques libres (le plus souvent Fe) dans la solution décapante.
La relation suivante peut être considérée comme valeur indicative: la teneur en Fe libre en mg/l ne devrait pas dépasser la température du bain en °C.
Si la teneur en ions métalliques est trop forte, le liquide décapant devrait être remplacé complètement ou partiellement par de l'acide frais.

– Solution de décapage pulvérisée
Elle se compose normalement d'acide nitrique (HNO_3) et d'acide fluorhydrique (HF) mélangés avec un liant et des substances tensioactives afin qu'elle ne s'écoule pas trop rapidement de la pièce. Elle est pulvérisée sur de larges surfaces. Pour des caractéristiques décapantes moins fortes, on peut aussi utiliser de l'acide phosphorique. Cette méthode convient pour de grandes pièces qui ne trouvent pas de place dans un bain. Pour la pulvérisation de décapant, on a besoin entre autres de locaux spéciaux équipés en conséquence (écoulement des eaux usées, ventilation, vêtement de protection pour le personnel).

– Pâte décapante
La pâte se compose habituellement d'un mélange d'acides de HNO_3 et HF avec un liant. Elle convient pour le décapage de zones limitées, principalement dans les zones soudées. A des températures inférieures à +5 °C, l'action est très faible. A des températures de la matière de plus de 40°, il y a un risque d'évaporation de la pâte. L'action décapante s'en trouve fortement diminuée et le rinçage est rendu plus difficile.

– Passivation / décontamination
Cette procédure se réalise de la même manière que le décapage. La substance active n'est cependant dans ce procédé que de l'acide nitrique à 18–20 % à environ 20 °C. Ce traitement renforce la couche passive. Il est particulièrement important s'il y a un risque d'impuretés due au fer, car l'acide nettoie la surface de ces impuretés. Pour cette raison, on parle aussi d'une décontamination. Comme après le décapage, un rinçage à l'eau est nécessaire.

– Polissage électrolytique
Ce processus électrochimique assure une résistance optimale à la corrosion. La surface acquiert un brillant élevé et un micro-profil équilibré qui répond aux plus hautes exigences d'hygiène (voir aussi chapitre 5.4.3).

Après tout traitement chimique, la pièce doit être correctement nettoyée sous haute pression. L'eau de rinçage doit être recueillie séparément, neutralisée et éliminée.

– Neutralisation / Elimination
Les liquides de rinçage contiennent des acides et sont polluées par des métaux lourds, principalement le chrome et le nickel, et ils doivent donc être neutralisés. La neutralisation se fait avec un produit alcalin, au mieux avec de la chaux technique éteinte ou avec un produit de neutralisation du commerce. **Les boues résiduelles doivent être traitées comme des déchets spéciaux contenant des métaux lourds et éliminées conformément aux prescriptions en vigueur.**

– Impuretés organiques
Les impuretés de ce genre sont les graisses, les huiles, les restes de colle, les empreintes de doigts, les peintures et divers dépôts. De telles impuretés peuvent causer dans un environnement agressif une corrosion dans les fissures et empêcher un décapage correct, car les acides décapants n'agissent que sur les impuretés inorganiques! Les impuretés organiques doivent être enlevées avant le décapage au moyen de produits de nettoyage et de dégraissage **exempts de chlorures.**

5.6 Brasage

Par l'emploi de brasures spéciales à l'argent et de flux, le brasage techniquement impeccable des aciers inoxydables est possible. Il faut toutefois tenir compte que les aciers inoxydables et les brasures à l'argent ont des propriétés fondamentales fortement différentes. Il ne faut donc pas s'attendre à ce que les pièces d'acier inoxydable brasées se comportent comme des pièces d'un seul bloc.
Si les assemblages brasés entrent en contact avec de l'air humide ou des liquides, les relations doivent être examinées attentivement. **Les brasures contenant du zinc comme par exemple la brasure usuelle à l'argent L-Ag40Cd ne doivent en aucun cas être utilisées pour de telles applications, car elles entraîneraient une destruction rapide de l'assemblage par une corrosion aux surfaces limites – appelée aussi corrosion de la lame de couteau.** Pour certaines applications, par exemple l'industrie alimentaire, la chimie, la pharmacie et les conduites d'eau potables, il faut en outre tenir compte que les brasures ne doivent contenir aucune substance toxique (cadmium, plomb, etc.).
Dans le cas de brasage durant longtemps à des températures entre 600 et 800 °C, il faut veiller aussi à la décomposition du grain déjà cités pour les aciers non stabilisés. Les directives générales pour les constructions brasées s'appliquent aussi aux aciers inoxydables. Si la construction, le processus de brasage et la technique de travail concordent, des assemblages extrêmes brasés sont aussi possibles, comme le montre par exemple les fonds en aluminium ou en cuivre brasés sur des casseroles en acier inoxydable.

5.7 Collage

Les aciers inoxydables peuvent être collés sans problème, à condition que l'on emploie des colles et des procédés appropriés. Pour éclaircir en vue d'un cas d'application précis la

© KOHLER 2016

colle et la méthode qui conviennent, on s'adressera aux fabricants et fournisseurs correspondants.

5.8 Rivetage, vissage

Lors du rivetage ou du vissage d'aciers inoxydables, il faut veiller à ce que les rivets, vis et rondelles soient si possible d'une matière identique ou plus noble. Si l'on utilise des vis ou des rivets de matière moins noble, par ex. des vis galvanisées ou des rivets d'aluminium, il y a un risque de corrosion de contact, si le joint entre en contact avec un liquide conducteur d'électricité. En raison des rapports de surface différents (grande surface d'acier inoxydable – petite surface non noble des vis ou rivets), la corrosion des vis ou rivets non nobles se trouve renforcée.
Pour les vis en acier inoxydable, il faut remarquer que l'acier inoxydable a une tendance marquée au grippage (soudage à froid). Cela peut conduire dans un assemblage vissé à ce qu'il ne soit pas assez serré ou qu'il ne puisse plus être desserré plus tard. Ce problème peut être évité en graissant suffisamment le filet avant le serrage. Au besoin, le lubrifiant doit être adapté à l'application correspondante (par exemple domaine alimentaire).

5.9 Problèmes de contacts de l'acier inoxydable avec d'autres matériaux

Le risque de corrosion de contact doit aussi être pris en considération dans l'assemblage de matériaux moins nobles avec de l'acier inoxydable (par ex. raccords de tubes en acier inoxydable au moyen de tubes galvanisés ou de robinetterie en bronze, raccord de profils en acier inoxydable avec des profils galvanisés). Dans ce cas, les facteurs suivants jouent un rôle:

- présence éventuelle de fluide corrosif conducteur d'électricité
- potentiels de corrosion des matériaux utilisé dans le fluide en question
- rapport des surfaces: plus le rapport des surfaces entre la matière noble et la matière non noble est grand, plus la vitesse de corrosion du partenaire non noble est grande.

Selon le risque de corrosion, il peut être nécessaire de séparer électriquement les différentes parties, par ex. par interposition de rondelles, douilles et joints de matière plastique (voir aussi le tableau du chapitre 2.2.5).

5.10 Traitement thermique

Un traitement thermique peut modifier les caractéristiques d'un acier. Avec les aciers inoxydables, les changements suivants sont possibles:

- annulation partielle ou complète des modifications produite par une déformation à froid (écrouissage, caractéristiques physiques comme magnétisme, etc.)
- élimination des auto-contraintes
- homogénéisation de la structure et dissolutions de carbures et d'autres précipitations intermétalliques
- adaptation des caractéristiques mécaniques pour les alliages trempables

Sur les aciers non stabilisés au titane, il faut absolument veiller à ce qu'ils ne soient pas maintenus plus longtemps que ce qui est absolument nécessaire à des températures dans le domaine de 480–760 °C, car sinon il peut se former des carbures aux joints des grains, qui entraînent une réduction de la résistance à la corrosion dans le domaine des limites des grains (corrosion aux joints des grains).

5.10.1 Aciers ferritiques

Les aciers ferritiques sont soumis à un recuit doux dans le domaine de 750–850°C pour une durée de maintien de 1 h par 25 mm d'épaisseur de matière. Ils sont ensuite refroidis à l'air. Les aciers ferritiques ne sont pas trempables en raison de leur basse teneur en carbone.

5.10.2 Aciers martensitiques

Ces aciers sont utilisés normalement à l'état amélioré. On obtient ainsi une bonne combinaison entre la résistance (dureté), la ténacité et la résistance à la corrosion. Lors de l'amélioration, l'acier subit deux traitements thermiques différents:

1. Trempe
2. Revenu

Lors de la trempe, l'acier est chauffé à 1000 °C environ et ensuite trempé dans l'huile ou l'eau. Par le changement de structure d'austénite en martensite, l'acier devient dur, mais aussi plus fragile. Afin d'assurer une bonne ténacité, les contraintes dues à la trempe dans la structure doivent être éliminées par un traitement thermique supplémentaire. Cela s'obtient par un revenu à une température définie. Par le choix de la température de revenu, on peut varier la dureté dans certaines limites. Elle est déterminée sur le diagramme de revenu dans les brochures des produits. En général, la dureté et la résistance à la corrosion diminuent quand la température de revenu augmente, la ténacité est par contre diminuée. Après le revenu, on laisse le matériel se refroidir à l'air.

5.10.3 Aciers austénitiques et duplex

La température de recuit des aciers austénitiques se situe vers 1070–1170°C, et celle des aciers austéno-ferritiques vers 1000–1100°C. Les aciers austénitiques et austéno-ferritiques sont refroidis dans l'eau après le recuit. Les sections minces peuvent se refroidir à l'air libre. Ces aciers ne durcissent pas par la trempe, mais il est néanmoins possible, par un processus spécial (**Kolstérisation**®), d'obtenir une surface mince dure (entre 1000 et 1200 $HV_{0.05}$, correspondant à 74 HRC env.), qui améliore en outre le comportement au grippage et partiellement aussi la résistance à la corrosion de ces matières.

5.10.4 Aciers à durcissement par précipitation

Pour les aciers à durcissement par précipitation, on produit par un traitement thermique spécial des précipitations très fines, finement réparties dans la structure, qui produisent une augmentation correspondante de la dureté et de la résistance.

5.11 Nettoyage et entretien

Une méthode simple et efficace pour prolonger la durée de vie de produits en acier inoxydable est d'empêcher des concentrations (dépôts) de matières nocives (par ex. chlorures) par un rinçage régulier et à fond à l'eau propre.
Comme déjà lors de la mise en oeuvre, il faut veiller aussi lors du nettoyage de l'acier inoxydable à ce que celui-ci n'entre pas en contact avec de l'acier non allié (par ex. brosses d'acier, abrasifs, etc.). Il faut donc utiliser des brosses en acier inoxydable ou en plastique ou des abrasifs (par ex. ScotchBrite) qui n'ont pas été auparavant en contact avec de l'acier non allié. Si la surface est nettoyée au moyen d'abrasifs, l'abrasif doit être plus dur que la saleté, mais plus tendre que la sur-

© KOHLER 2016

face de l'acier, sinon la couche passive sera blessée. En cas de dégâts à la couche passive, il faut s'assurer de la régénération parfaite d'une couche passive (exempte de graisse).
Pour le nettoyage chimique de surfaces d'acier inoxydable, on a indiqué dans le tableau 7.12 une série de produits de nettoyage. On trouve aussi sur le marché des produits de nettoyage spéciaux pour éliminer la rouille erratique ainsi que des produits d'entretien ayant des propriétés protectrices.
L'acide chlorhydrique (HCl) et l'acide fluorhydrique (HF) ne conviennent pas comme produit de nettoyage car ils conduisent à une attaque prononcée de la surface déjà à une concentration faible. Il faut également observer que les produits de désinfection et de nettoyage qui sont utilisés dans la branche alimentaire et les piscines contiennent souvent de l'hypochlorite de sodium qui peut aussi causer de la corrosion.

Nettoyage sur chantier d'installations en acier inoxydable
Les aciers inoxydables ne peuvent développer pleinement leur résistance à la corrosion que si leur surface est réellement propre. Il est donc extrêmement important de veiller non seulement lors de la mise en oeuvre, mais déjà au transport et au stockage, à ce que l'acier inoxydable n'entre pas en contact avec de l'acier non allié.
Les parties de construction qui sont montées sur le chantier sont souvent souillées lors de la mise en oeuvre même, ou par des influences extérieures, comme par exemple:

- travail et montage d'autres pièces et matières
- contact avec des engins de levage en acier non allié → utiliser des sangles
- appui en acier non allié (supports d'étagères, bords de ponts de chargement)
- stockage avec des aciers non alliés → stocker séparément et couvrir!
- travail avec des outils déjà utilisés pour des aciers non alliés → toujours utiliser des outils séparés pour l'acier inoxydable
- utilisation de brosses en acier ordinaire ou en laine d'acier → utiliser des brosses en acier inoxydable ou en plastique, respectivement du ScotchBrite propre
- utilisation de grenaille (sable) pollué par des aciers non alliés
- utilisation de papier abrasif ou de meules contenant de l'oxyde de fer.

Les particules de fer adhérant sur la surface d'acier inoxydable se corrodent sous l'influence de l'humidité de l'air après peu de temps et cause ce qu'on appelle de la rouille erratique ou même éventuellement des piqûres de corrosion.

Mais des problèmes de corrosion peuvent aussi être causés sur les objets finis par des souillures par des

- matières organiques comme les huiles, graisses, peintures, solvants, marques, empreintes de pieds et de mains
- produits de nettoyage ou désinfectants agressifs ou contenant du chlore ou du brome qui n'ont pas été complètement rincés ou neutralisés
- fils et bandes d'attache en acier ordinaire → utiliser des bandes en plastique
- couleurs de revenu à la suite de surchauffe lors du soudage, tronçonnage, meulage, chauffage → décaper, meuler
- résidus de soudure comme laitiers ou gouttes froides
- restes de colle de rubans adhésifs ou d'étiquettes.

Dans de tels cas, il est souvent extrêmement difficile et lié à des frais élevés et des désagréments de devoir déterminer ultérieurement la cause effective de la corrosion.

En général, le fournisseur n'est responsable que des défauts de matière prouvés et seulement dans l'étendue de la valeur du matériel livré et non pas pour les dégâts consécutifs!

Il s'ensuit qu'un nettoyage impeccable après la fabrication peut épargner beaucoup de désagréments et des frais élevés. Selon l'étendue des souillures, le nettoyage peut se faire avec les produits suivants, éventuellement combinés:

- brosses en acier inoxydable ou en plastique
- meulage avec des abrasifs utilisés exclusivement pour l'acier inoxydable
- grenaillage avec des grenailles exemptes d'oxyde de fer, par ex. des billes de verre
- éponges abrasives comme ScotchBrite
- décapage avec de la pâte ou au bain.

Pour le nettoyage après le montage, mais aussi en cours d'exploitation, on peut utiliser selon le problème de nettoyage les produits de nettoyage récapitulés dans le tableau 7.12. Pour obtenir des résultats impeccables, il faut d'une part respecter exactement les instructions de service et d'autre part, les surfaces nettoyées doivent être rincées soigneusement avec de l'eau propre, si possible à haute pression. Les restes de produits de nettoyage qui n'ont pas été rincés ou neutralisés peuvent aussi conduire à de la corrosion. Les fournisseurs compétents vous conseilleront volontiers.

6 NORMES

6.1 EN 10088

La série de normes EN 10088 fut introduite en 1995 au niveau européen (pays membres du CEN - Comité Européen de Normalisation) pour les produits d'aciers inoxydables utilisés à des fins générales, et afin de veiller à ce que les différentes normes nationales soient progressivement remplacées.
Une première révision majeure complétée a été introduite à l'automne 2005. En 2009 furent introduites les parties 4 et 5 et en fin 2014 les parties 1 à 3 furent complètement révisées pour la seconde fois.
La norme EN 10088 est actuellement composée des éléments suivants:

Partie 1
Liste des aciers inoxydables.
On y relève 132 aciers résistants à la corrosion, 21 aciers réfractaires et 29 aciers résistants à la chaleur avec leur composition chimique et des informations sur leurs caractéristiques physiques. En outre, d'autres tabelles contiennent une cartographie des produits en aciers inoxydables aux normes européennes et permettent une comparaison avec d'autres systèmes de désignation (ISO, UNS, JIS, ISC).

Partie 2
Conditions techniques de livraison pour tôles et bandes en aciers inoxydables pour un usage général.

© KOHLER 2016