

Traitements thermiques des aciers inoxydables. Guide de choix

par **Hervé SASSOULAS**

Ingénieur civil des Mines

Ingénieur de recherche. Centre de recherches d'Ugine. Ugine-Savoie

1. Présentation des divers traitements thermiques	M 1 160 - 2
1.1 Traitements d'homogénéisation	— 2
1.2 Traitements de durcissement	— 3
1.2.1 Austénitisation et trempe martensitique	— 3
1.2.2 Durcissement par précipitation	— 3
1.3 Traitements d'adoucissement	— 4
1.3.1 Action par restauration de la structure	— 4
1.3.2 Action par recristallisation	— 4
1.3.3 Action par coalescence et globularisation de précipités	— 4
1.3.4 Action par grossissement de grain	— 4
1.3.5 Action par transformation de phase	— 4
1.4 Traitements de détente	— 4
1.4.1 Détente à basse température.....	— 5
1.4.2 Détente par fluage	— 5
1.5 Traitements superficiels	— 5
1.6 Traitements de désensibilisation.....	— 5
2. Incidents au traitement thermique et remèdes.....	— 5
2.1 Tapures	— 5
2.2 Fragilité.....	— 5
2.3 Sensibilisation.....	— 6
2.4 Variations dimensionnelles.....	— 6
2.5 Modification d'analyse en peau	— 6
Pour en savoir plus.....	Doc. M 1 160

Les traitements thermiques pratiqués durant la gamme de fabrication des aciers inoxydables ont des conséquences sur les propriétés suivantes :

- résistance à la corrosion ;
- propriétés mécaniques (résistance, ductilité, fragilité) essentiellement appréhendées par les essais de traction et de résilience ;
- état de surface (oxydation superficielle, rugosité, analyse chimique en extrême peau) ;
- dimensions et forme ;
- stabilité dimensionnelle.

Le meilleur traitement thermique sera celui qui permet d'atteindre, au moindre coût, le but principal, amélioration des qualités, tout en évitant ou minimisant les effets secondaires indésirables.

Pour chaque catégorie de traitement envisagée, nous préciserons le but et les moyens de l'obtenir.

Nous présentons ensuite les incidents susceptibles d'intervenir en cours de traitement ainsi que les remèdes correspondants.

Le lecteur pourra se référer pour plus de détails sur ces traitements à l'article *Traitements thermiques des aciers inoxydables* [10].

1. Présentation des divers traitements thermiques

Comme indiqué en introduction, leur objectif est une amélioration de certaines propriétés mais ils ont souvent des effets secondaires sur les autres propriétés. Nous avons distingué six types de traitements thermiques et le tableau 1 les présente, en fonction de leurs buts et de leurs effets secondaires ; leur situation dans la gamme de fabrication est également précisée.

Ce paragraphe décrit pour chaque type le but du traitement pratiqué et ce qu'il faut faire au minimum pour l'obtenir.

Remarque : en ce qui concerne les températures d'exécution des traitements thermiques pour une nuance particulière, le lecteur trouvera, en sus des indications générales contenues ci-après, des indications dans les annexes A des normes européennes et donc françaises NF EN 10088-2 et NF EN 10088-3.

1.1 Traitements d'homogénéisation

Les traitements d'homogénéisation proprement dits, visant à réduire les ségrégations d'éléments chimiques apparues lors de la solidification, sont pratiqués sur pièces moulées ou forgées de taille importante. Un cas particulier important est le **traitement antiferrite** des nuances austénitiques se solidifiant partiellement en phase ferritique, qui a pour but de limiter la teneur en ferrite hors équilibre due aux surconcentrations locales en éléments alphas apparues durant la solidification (ségrégations).

Un autre cas où une homogénéisation peut être bénéfique est le cas des nuances martensitiques présentant après trempe à l'ambiance de l'austénite résiduelle : toute homogénéisation de la teneur en éléments gammagènes, en particulier le carbone, **diminuera la teneur en austénite résiduelle**.

Sur demi-produits sidérurgiques (brames et blooms de coulée continue, lingots) une certaine homogénéisation est apportée par le réchauffage préalable aux opérations de dégrossissage.

Une combinaison minimale temps-température est nécessaire pour obtenir une homogénéisation donnée et comme toujours en pareil cas, il est plus intéressant de jouer sur le facteur température que sur le facteur temps. On choisira donc des températures supérieures à 1 100 °C. La détermination du temps minimal t à employer est possible si l'on a connaissance du coefficient de diffusion D , à la température visée pour le traitement, de l'élément dont la teneur est à homogénéiser. Le métal à homogénéiser présente des pics et des creux de teneur locale. Soit ΔC_0 l'écart entre les teneurs aux pics et aux creux, et ℓ la distance moyenne entre un pic et un creux adjacents. Soit ΔC l'écart maximal de teneur souhaité après homogénéisation. On peut calculer le temps t par la formule :

$$\Delta C / \Delta C_0 = \exp(-\pi^2 D t / \ell^2)$$

avec D en m^2/s

Le traitement d'**hypertrempe** pratiqué sur les nuances inoxydables austénitiques et austéno-ferritiques peut aussi être classé dans les traitements d'homogénéisation. Dans ce cas, le but est d'obtenir un métal dans lequel les éléments interstitiels (carbone et azote) ont été remis en solution et exempt de phases intermétalliques du type sigma, phases de Laves, phase χ , etc. Ce but sera atteint si une température minimale est atteinte en tout point de la pièce (et donc en particulier au point le plus froid) lors du traitement : la température minimale sera comprise entre 1 000 °C et 1 150 °C et sera choisie dans la partie haute de cette fourchette pour les nuances contenant du molybdène.

Le temps global de maintien en température de la pièce sera déduit de cet impératif, soit empiriquement, soit par calcul thermique préalable (formules analytiques, simulation thermique de la mise en température de la pièce par éléments finis ou autre méthode numérique). Il faudra bien évidemment tenir compte du mode de transmission de l'énergie thermique à la pièce : rayonnement dans les fours, convection dans les fluides (bains de sels, gaz).

Tableau 1 – Caractéristiques des traitements thermiques des aciers inoxydables

Traitement thermique	Buts	Processus métallurgiques mis en œuvre	Situation dans la gamme de fabrication	Effets secondaires éventuels
Homogénéisation	— Diminuer l'ampleur des ségrégations. — Obtenir une phase homogène.	Maintien à haute température (diffusion des éléments ségrégués, dissolution de précipités ou de phases intermétalliques).	— Diminuer l'ampleur des ségrégations : à l'amont du procédé. — Obtenir une phase homogène : traitement de qualité final.	— Grossissement de grain durant le maintien à haute température. — Apparition de contraintes résiduelles lors de la trempe éventuelle.
Durcissement	Augmenter les caractéristiques mécaniques.	— Austénitisation puis transformation martensitique. — Durcissement secondaire par précipitation.	En fin de gamme.	Fragilisation.
Adoucissement	— Augmenter la ductilité. — Diminuer la fragilité.	— Élimination des dislocations par restauration ou recristallisation. — Coalescence et globularisation des précipités. — Grossissement de grain. — Transformations de phase.	— Ajustement des propriétés mécaniques après durcissement. — Opération préliminaire à une mise en forme à froid (laminage, tréfilage, frappe, emboutissage, usinage).	Perte de résistance mécanique.
Détente	Éliminer une partie des contraintes résiduelles (au moins les pics de contrainte résiduelle).	— Par abaissement de la limite d'élasticité avec la température. — Par relaxation des contraintes (fluage).	— Après refroidissement rapide lors d'un traitement antérieur. — Après soudage. — Après mise en forme	— Sensibilisation à la corrosion intergranulaire. — Fragilisation.
Traitements superficiels	Augmenter la dureté en surface.	Apport d'interstitiels.	En fin de gamme.	Sensibilisation à la corrosion intergranulaire.
Désensibilisation	Supprimer la sensibilité à la corrosion intergranulaire due aux carbures de chrome.	Homogénéisation de la teneur en chrome autour des carbures (diffusion).	Après mise en forme à chaud ou soudage.	Adoucissement.

Comme **exemple de règle empirique**, mentionnons qu'il faut au minimum 0,7 minute de maintien total par millimètre d'épaisseur pour une pièce placée dans un four à température d'hypertrempe et chauffant la pièce essentiellement par rayonnement.

Nous donnons à titre de second exemple une formule analytique valable pour une pièce de faible épaisseur (< 5 mm) placée dans un bain de sels porté à la température T_b .

Si l'on pose :

$$t_c = \rho_0 c e / 2 h$$

avec t_c temps caractéristique dépendant de ρ_0 , c , e et h ,
 ρ_0 (kg · m⁻³) masse volumique,
 c (J · kg⁻¹ · K⁻¹) capacité thermique massique,
 e (m) épaisseur,
 h (W · m⁻² · K⁻¹) coefficient de transmission thermique de surface entre bain et tôle.

le temps pour atteindre une température T en partant d'une température T_i est de :

$$t = t_c \times \ln [(T_b - T_i) / (T_b - T)]$$

Pour T_b et T voisins de 950 °C et pour un bain donné nous avons trouvé h voisin de 600 W · m⁻² · K⁻¹.

Les traitements visant à réhomogénéiser la teneur en chrome du métal après précipitation de carbures de chrome qui sensibilisent à la corrosion intergranulaire sont décrits dans le paragraphe [1.6](#).

1.2 Traitements de durcissement

1.2.1 Austénitisation et trempe martensitique

Il s'agit du traitement privilégié de durcissement des nuances martensitiques et ferrito-martensitiques, que ces nuances soient ou non ensuite durcies par précipitation structurale.

En pratique, on choisira la température d'austénitisation dans la gamme 950-1 100 °C, le choix de cette température devant tenir compte des impératifs suivants :

- austénitisation la plus complète possible pour éviter la ferrite δ formée si la température est trop élevée, cela étant particulièrement à craindre dans le cas des nuances à faibles teneur en carbone (d'où le choix d'une température inférieure à 1 100 °C, et même à 1 050 °C pour C < 0,15 %) ;
- mettre en solution la fraction voulue de carbures pour assurer une dureté suffisante après trempe sans trop stabiliser l'austénite (on aurait alors présence d'austénite résiduelle après trempe). La température de 1 050 °C est souvent un bon compromis pour les nuances à forte teneur en carbone (C > 0,15 %) ;
- en tout état de cause dissoudre le plus possible les carbures intergranulaires ;

— dans le cas d'un acier à durcissement par précipitation, la totalité des éléments devant participer à la précipitation ultérieure devra être mise en solution, ce qui aboutit généralement à choisir une température comprise entre 940 et 960 °C (aciers à transformation indirecte), ou entre 1 000 et 1 050 °C (aciers à transformation directe).

L'austénitisation est une transformation rapide et en pratique c'est donc la dissolution des carbures dans l'austénite qui va dicter la durée de maintien nécessaire à température maximale. Pour une nuance destinée à la coutellerie (0,3 < C < 0,5 %) traitée à 1 050 °C, une durée totale de traitement d'une demi-heure est suffisante.

En ce qui concerne la vitesse de trempe, une trempe à l'air est suffisante dans la quasi-totalité des cas pour assurer que l'austénite ne se transforme pas en ferrite (seule exception : épaisseur supérieure à 20 mm et faible teneur en carbone : < 0,15 %). Pour assurer la transformation de toute l'austénite en martensite, les précautions suivantes devront être prises pour les nuances contenant du nickel ou à forte teneur en carbone (C > 0,35 %) :

- atteindre effectivement la température ambiante ;
- rester un temps suffisant (quelques heures) à l'ambiante ;
- traiter par le froid (- 80 °C), dans ce cas, il ne faudra pas rester trop longtemps à l'ambiante (une ou deux heures au maximum) car ce maintien peut stabiliser l'austénite ;
- effectuer un écrouissage à froid.

D'autres impératifs concernant le refroidissement seront cités dans le paragraphe traitant des incidents possibles (voir tapures : [2.1](#) et sensibilisation : [2.3](#)).

1.2.2 Durcissement par précipitation

Les traitements de durcissement par précipitation s'appliquent à certains aciers inoxydables austénitiques ou martensitiques. Le traitement de précipitation de la phase durcissante doit obligatoirement être précédé de sa remise en solution complète car l'on doit pouvoir contrôler la taille des précipités. Cette remise en solution est pratiquée lors d'un traitement d'austénitisation (nuances martensitiques) ou d'hypertrempe (nuances austénitiques). Un écrouissage à froid pourra être intercalé entre dissolution et précipitation, ce qui favorisera la finesse de la précipitation.

Lors du revenu de précipitation, la température sera choisie en fonction du compromis résistance mécanique-ductilité que l'on souhaite. De façon générale, une température basse donnera une meilleure résistance mécanique car les précipités resteront de faible taille donc durcissants et une température plus élevée conduira à une meilleure ductilité par coalescence des précipités (phénomène de survieillessement).

Pour illustrer le propos, nous donnons dans le tableau [2](#) les propriétés mécaniques en fonction de la température de vieillissement pour la nuance martensitique X5CrNiCuNb 16-4 (normalisée en Europe sous l'appellation 1.4542) après austénitisation à 1 040 °C et trempe air.

Tableau 2 – Influence de la température de vieillissement sur les propriétés mécaniques de la nuance à durcissement par précipitation X5 CrNiCuNb 16-4 (1.4542) norme NF 10088-3

Caractéristiques	Durée et température de vieillissement		
	1 h à (540-560 °C)	1 h à (580-600 °C)	4 h à (610-630 °C)
Limite d'élasticité $R_{p0,2}$ (MPa)	> 1 000	> 800	> 600
Allongement A (%)	> 10	> 12	> 14

1.3 Traitements d'adoucissement

Ces traitements ont parfois pour but d'abaisser les caractéristiques mécaniques et plus souvent de redonner de la ductilité au métal en éliminant des dislocations apparues soit au cours d'une trempe martensitique, soit au cours d'une opération d'érouissage à froid. Ils opèrent soit par restauration de la structure, soit par recristallisation, soit par grossissement de grain, soit par transformation de phase. Ils sont présentés en fonction de cette différenciation dans la suite du texte.

Ils ont aussi parfois pour but de coalescer et de globaliser des précipités apparus de façon involontaire (dans les aciers inoxydables, il s'agit généralement de carbures de chrome). Ils se confondent alors aux traitements de désensibilisation mentionnés au paragraphe 1.6.

1.3.1 Action par restauration de la structure

Le revenu des aciers inoxydables martensitiques vise une restauration partielle de la structure, fortement érouie par la transformation martensitique. On atteindra le degré souhaité de restauration et donc les caractéristiques mécaniques voulues en ajustant le temps de maintien à la température de revenu choisie entre 550 °C et le point de transformation Ac_1 (température à laquelle l'austénite commence à se former au cours du chauffage). Un paramètre pertinent pour caractériser l'action d'un couple temps-température donné est le paramètre de Larson-Miller [9] :

$$P = (T/1000)(20 + \lg t)$$

avec T (K),
 t (h).

En dessous de $P = 15$, le revenu n'a pas d'action. Ensuite, son action dépend beaucoup de P [10]. **Le couple temps-température, et en particulier la température, devra donc être respecté avec une bonne précision sous peine de ne pas obtenir les caractéristiques visées.**

Dans le cas d'un traitement d'adoucissement complet par maintien prolongé au-dessous du point Ac_1 visant une restauration poussée du métal ($P > 21$), il faudra éviter tout passage accidentel au-dessus du point Ac_1 .

1.3.2 Action par recristallisation

Cet adoucissement du métal par recristallisation est mis en œuvre lors des recuits effectués après une opération de laminage ou de tréfilage à froid afin de redonner au métal des possibilités de déformation à froid nécessaire pour la poursuite de la gamme de transformation. De tels recuits sont pratiqués sur les aciers inoxydables ferritiques, austénitiques et austéno-ferritiques.

En fonction de l'érouissage à froid précédant le recuit, la température minimale permettant d'obtenir la recristallisation totale du métal en un temps raisonnable (une à deux secondes pour un recuit en continu) variera : elle sera d'autant plus basse que l'érouissage à éliminer sera important. En pratique, après un érouissage de 50 % à froid, une température autour de 800 °C suffira (un peu plus pour les austénitiques, un peu moins pour les ferritiques). Rappelons qu'il s'agit là de la température minimale pour assurer la recristallisation et que d'autres impératifs interviendront dans le choix de la température de recuit (éviter la sensibilisation par exemple), d'où une température minimale de 1 000 °C pour les austénitiques.

1.3.3 Action par coalescence et globularisation de précipités

Ce phénomène est mis en œuvre lors du recuit au-dessous du point de transformation Ac_1 des aciers inoxydables semi-ferritiques (aciers ferritiques non stabilisés) au cours duquel les carbures de chrome deviennent moins nombreux et plus sphériques, conduisant ainsi à un adoucissement, la mobilité des dislocations étant largement restaurée.

Une température de 750 °C est un minimum pour obtenir un effet en un temps raisonnable et une température supérieure permettra de réduire le temps de maintien. Pour une température de 820 °C, un temps de maintien effectif de deux heures de la partie la plus froide de la pièce sera suffisant.

Durant le traitement, aura lieu en parallèle la rechromisation du métal autour des carbures, restaurant les propriétés de résistance à la corrosion du métal (cf. § 1.6).

1.3.4 Action par grossissement de grain

Les caractéristiques mécaniques d'un métal sont d'autant plus élevées que son grain est plus fin. La limite d'élasticité, par exemple, dépend de l'inverse de la racine carrée de la taille de grain d selon la loi de Hall-Petch :

$$R_e = C_1 + C_2 \times 1/\sqrt{d}$$

C_1 et C_2 constantes.

Tout grossissement de grain conduira donc à un adoucissement du métal. Il est impossible d'utiliser ce phénomène dans le cas des aciers inoxydables ferritiques car le grossissement de grain entraînerait une fragilisation du métal. Par contre, le phénomène peut être utilisé et est utilisé dans le cas des aciers inoxydables austénitiques, insensibles à la fragilisation par grossissement de grain. Le traitement correspondant est souvent réalisé en continu (dans la chaude de laminage, ou lors d'un recuit continu par maintien supplémentaire après obtention de la recristallisation primaire). Il est appliqué par exemple aux aciers destinés à la frappe à froid. On peut obtenir des grains dont la taille atteint la centaine de micromètre (après, par exemple, quelques minutes de maintien effectif à 1150 °C). Signalons que le grossissement de grain peut être bloqué par divers précipités ou inclusions et que dans ce cas l'on peut obtenir une structure hétérogène (présentant une famille de grains ayant grossi et une autre famille de grains plus petits).

1.3.5 Action par transformation de phase

L'adoucissement maximal des aciers inoxydables martensitiques à forte teneur en carbone est obtenu par élimination de la martensite issue des opérations à chaud antérieures. Il peut être nécessaire pour réaliser une mise en forme à froid. Cette élimination repose sur une austénitisation totale suivie d'un refroidissement suffisamment lent pour transformer la totalité de l'austénite en ferrite plus carbures. Au cours du refroidissement qui ne devra pas excéder 20 °C par heure et sera même de préférence de l'ordre de 10 °C par heure, se produisent les phénomènes suivants : déstabilisation de l'austénite par précipitation de carbures, formation de l'agrégat ferrite plus carbures, coalescence des carbures.

1.4 Traitements de détente

Des contraintes résiduelles peuvent apparaître dans les pièces lors de refroidissements rapides (trempe martensitique, hypertrempe des austénitiques et des austéno-ferritiques, soudage) ou lors de mises en forme à froid (usinage ou emboutissage par exemple).

Les traitements de détente visent à réduire ces contraintes résiduelles par abaissement de la limite d'élasticité ou par fluage.

1.4.1 Détente à basse température

La plage est de 200 à 350 °C pour les martensitiques et de 200 à 400 °C pour les austénitiques. De tels traitements diminuent peu les contraintes résiduelles mais notablement les pics locaux de contrainte qui peuvent avoir des effets néfastes sur la fragilité (nuances martensitiques) ou la résistance à la corrosion sous contrainte (nuances austénitiques).

La durée typique de tels traitements est d'une heure. Aller au-delà n'apporterait rien puisque le fluage n'intervient pas, mais uniquement l'abaissement de la limite d'élasticité avec la température.

1.4.2 Détente par fluage

Elle concerne les aciers inoxydables austénitiques et se pratique entre 550 et 1 050 °C, la proportion de contraintes résiduelles supprimées par le traitement passent de 35 % à 550 °C à 100 % à 1 050 °C. Pour que les contraintes résiduelles soient effectivement supprimées, il importe que le maintien soit au minimum de 2,5 minutes par millimètre d'épaisseur (four à moufle) et que le refroidissement réalisé à l'issue du maintien en température soit suffisamment lent (à l'air calme tout au plus) et en tout état de cause plus lent que le refroidissement ayant éventuellement généré les contraintes à supprimer.

1.5 Traitements superficiels

Les traitements superficiels sont peu pratiqués sur les aciers inoxydables car le carbone et l'azote, traditionnellement utilisés pour les durcissements superficiels, provoquent dans les aciers inoxydables soit une fragilité, soit une sensibilisation à la corrosion intergranulaire, soit les deux.

Les traitements de cémentation sont exclus, mais dans certains cas une nitruration peut être envisagée. Nous ne décrivons pas ici les possibilités actuelles, et renvoyons aux références [6] [7] [8].

1.6 Traitements de désensibilisation

Les aciers inoxydables ferritiques non stabilisés sont systématiquement sensibilisés à la corrosion intergranulaire à la suite d'une opération de mise en forme à chaud ou de soudage car, durant ces opérations, les carbures de chrome ont été mis en solution et ils précipitent ensuite quelle que soit la vitesse de refroidissement.

Les aciers inoxydables austénitiques non stabilisés sont sensibilisés à la corrosion intergranulaire si après traitement à haute température l'on n'a pas pu adopter un refroidissement suffisamment rapide (cf. § 2.3), par exemple par crainte de générer des contraintes résiduelles inacceptables [5].

Dans les deux cas, la sensibilisation à la corrosion intergranulaire résulte d'un appauvrissement en chrome du métal autour des carbures de chrome apparus aux joints de grain lors du refroidissement : si localement la teneur en chrome est inférieure à 10,5 % environ autour des carbures, la tenue à la corrosion des joints de grain devient insuffisante provoquant une attaque localisée et les carbures sont dits **sensibilisants**.

Les traitements de désensibilisation consistent à conserver les carbures de chrome dans le métal sans les redissoudre et à supprimer leur caractère sensibilisant par augmentation de la teneur en chrome dans leur voisinage. Cette augmentation est obtenue par diffusion du chrome. Le traitement est effectué à une température comprise entre 750 et 850 °C pour les aciers ferritiques et entre 850

et 950 °C pour les aciers austénitiques. Le temps de maintien sera supérieur à une heure. Dans le cas des aciers ferritiques, le traitement, outre son effet désensibilisant, aura une influence bénéfique sur la fragilité (coalescence des carbures, restauration de la mobilité des dislocations).

Les traitements de désensibilisation sont aussi couramment appelés **traitements d'homogénéisation**.

2. Incidents au traitement thermique et remèdes

2.1 Tapures

La tapure est une fissuration du métal due aux contraintes d'origine thermique : elle peut apparaître au chauffage (fissuration à l'intérieur de la pièce) ou au refroidissement (fissuration en peau de pièce).

La tapure au chauffage concerne essentiellement les aciers inoxydables martensitiques, en particulier à forte teneur en carbone. Les précautions à prendre peuvent être les suivantes (elles visent toutes à limiter le gradient thermique cœur-peau) :

- entrer la pièce dans un four froid ;
- limiter la vitesse de montée en température (par exemple, ne pas dépasser 300 °C/h) ;
- effectuer un palier lors de la montée (en particulier à 600 °C ou avant de franchir le point de transformation Ac₁) ;
- dans le cas des pièces traitées en bain de sels, réchauffer au préalable dans un bain à température inférieure à celle d'austénitisation.

La tapure au refroidissement concerne également les aciers inoxydables martensitiques. Le risque de tapure élimine en pratique le choix de l'eau comme milieu de trempe pour ces nuances. Il impose parfois de pratiquer une trempe étagée (maintien vers 600 °C avant de descendre à la température ambiante).

On notera que la tapure peut apparaître durant un maintien à l'ambiante (tapure en différé) sur nuance martensitique ou sur nuance austénitique après écrouissage à froid ayant provoqué l'apparition de martensite. Dans les deux cas, on évitera toute prise d'hydrogène par le métal lors de traitements thermiques et l'on procédera dès que possible après la trempe ou l'écrouissage à un traitement de détente ou d'adoucissement.

Notons également qu'un choix judicieux de la géométrie des pièces traitées (pas d'angles vifs, ni de variations trop brusques de section) limite les risques de tapure.

2.2 Fragilité

Nous résumons ci-après les principales sources de fragilité pour les aciers inoxydables en précisant les plages de températures à éviter lors des traitements thermiques (la fragilisation en service n'est pas abordée).

Pour les **aciers martensitiques**, on évitera le revenu dans la plage 350-550 °C, source de fragilisation par formation de fins carbures M₇C₃.

Pour les **aciers austénitiques**, aucun risque de fragilisation lors des traitements thermiques.

Pour les **aciers ferritiques** les moins chargés en chrome (< 20 %), le seul risque lors des traitements thermiques sera, pour les nuances non stabilisées ou à teneur en carbone élevée, lié à la formation de carbonitrides de chrome fins et fragilisants ou à une austénitisation partielle. On évitera tout traitement à une température supérieure au point de transformation Ac₁ (risque d'austénitisation partielle) ou à 920 °C (remise en solution des carbures).

Pour les **aciers superferritiques** (chrome > 20 %, présence de molybdène) et pour les aciers **austénoferritiques**, il peut y avoir fragilisation par formation de phase σ et/ou de phases intermétalliques (plage à éviter 600 à 950 °C), ou de phase α' (plage à éviter 300 à 500 °C). On évitera tous les refroidissements lents après opération de mise en forme à chaud.

Pour les aciers superferritiques, mentionnons la fragilisation par grossissement de grain, qui est irréversible (elle ne peut pas être éliminée par un traitement thermique ultérieur). Les recuits de recristallisation seront donc de courte durée et l'énergie de soudage limitée.

2.3 Sensibilisation

La sensibilisation des aciers inoxydables apparaît par précipitation de carbures de chrome intergranulaires. Cette précipitation peut se produire :

- dans la phase austénitique, lors de la trempe air d'aciers inoxydables martensitiques. La parade consiste dans ce cas à utiliser une trempe plus énergique, à l'huile par exemple, non nécessaire du point de vue de la transformation martensitique, mais indispensable pour échapper au *nez* de précipitation des carbures intergranulaires ;
- lors de tout refroidissement même rapide d'un acier inoxydable ferritique dans lequel les carbures ont été dissous à haute température. La parade consiste préférentiellement à utiliser des nuances stabilisées ou, dans le cas où l'on emploie une nuance non stabilisée, à éviter toute montée à une température supérieure à 920 °C ou à A_{c1} ;
- après hypertrempe ou travail à chaud (900-1 200 °C) des aciers inoxydables austénitiques non stabilisés, si le refroidissement est plus lent qu'une valeur critique de vitesse dépendant de la teneur en carbone. Cette vitesse critique est d'autant plus élevée que la teneur en carbone est forte : pour $C = 0,050$ %, par exemple, on pourra laisser refroidir à l'air des barres jusqu'à un diamètre limite de 150 mm sans sensibiliser, pour $C = 0,080$ % ce diamètre limite sera ramené à 80 mm [5].

Si la sensibilisation n'a pu être évitée, ce qui est généralement le cas lors d'opérations de soudage, on peut soit hypertemper (nuances austénitiques), soit désensibiliser (nuances ferritiques et austénitiques : cf. § 1.6).

2.4 Variations dimensionnelles

Les variations dimensionnelles des pièces lors des traitements thermiques sont liées aux phénomènes suivants :

- relaxation des contraintes résiduelles présentes avant traitement ;
- dilatation thermique différentielle due aux gradients thermiques lors du traitement ;
- variation de volume lors des changements de phase (la ferrite et la martensite sont moins denses à température donnée que l'austénite) ;
- fluage des pièces sous leur propre masse.

Ces phénomènes ne sont pas propres aux aciers inoxydables et peuvent être limités par des dispositions pratiques du type utilisation d'un supportage adéquat pour les pièces (lutte contre les déformations liés au fluage sous la masse propre) et limitation des gradients thermiques, particulièrement lors du passage des températures de transformation de phase.

Nous pouvons signaler deux particularités des aciers inoxydables créant des risques spécifiques :

- la faible conductivité thermique des aciers inoxydables austénitiques qui aggrave, à pilotage de four donné, les gradients thermiques dans le produit ;
- la faible résistance au fluage des aciers ferritiques et austénoferritiques qui implique des choix de supports particulièrement soignés.

Mentionnons pour finir l'apport possible des méthodes numériques (en particulier du type éléments finis) dans le domaine de la thermique (prévision des gradients thermiques) mais surtout dans le domaine thermomécanique (prévision des températures et des transformations de phase, puis des déformations et contraintes en cours de traitement). Ces méthodes numériques pourront donc contribuer à une meilleure connaissance aussi bien des variations dimensionnelles que des contraintes résiduelles générées par un traitement thermique.

2.5 Modification d'analyse en peau

Nous avons regroupé dans le tableau 3 les incidents qui peuvent résulter des atmosphères de four, noté les conséquences, et proposé des remèdes.

Tableau 3 – Défauts de surface causés par les atmosphères de traitements thermiques

Modification chimique	Causes	Conséquences	Remèdes
Décarburation	Atmosphère oxydante.	<ul style="list-style-type: none"> — Généralement acceptable sur les nuances autres que martensitiques. — Généralement inacceptable sur les nuances martensitiques (dureté insuffisante en peau) 	<ul style="list-style-type: none"> — Régler le four réducteur (excès d'hydrocarbures). — Utiliser les bains de sels.
Carburation	<ul style="list-style-type: none"> — Atmosphère avec excès d'hydrocarbures. — Présence d'huiles ou de graisses en surface de produit. 	<ul style="list-style-type: none"> — Généralement inacceptable sur les nuances autres que martensitiques (sensibilisation à la corrosion intergranulaire). — Généralement acceptable sur les nuances martensitiques. 	<ul style="list-style-type: none"> — Si une certaine déchromisation peut être acceptée, régler l'atmosphère oxydante. — Sinon, utiliser une atmosphère plus inerte (recuit brillant, vide) en dégraissant soigneusement avant traitement.
Dénituration	Absence d'azote dans l'atmosphère de traitement (vide ou hydrogène pur).	Modification de l'équilibre ferrite-austénite des nuances austéno-ferritiques.	Travailler avec de l'azote dans l'atmosphère ($N_2 + H_2$, par exemple).
Nituration	Atmosphères de recuit brillant, ou d'azote pur.	Sensibilisation éventuelle à la corrosion intergranulaire.	<ul style="list-style-type: none"> — Limiter le temps de traitement (traitement en statique exclu). — Utiliser l'hydrogène pur.
Déchromisation	Atmosphère oxydante.	Aspect de surface dégradé, corrosion superficielle initiale, corrosion plus profonde amorcée sur zones déchromées (on appréciera l'acceptabilité au cas par cas).	<ul style="list-style-type: none"> — Sur les nuances martensitiques, régler le four réducteur. — Utiliser une atmosphère neutre (recuit brillant, vide). — Éliminer mécaniquement la couche déchromée après traitement.

Traitements thermiques des aciers inoxydables. Guide de choix

par **Hervé SASSOULAS**

Ingénieur civil des Mines

Ingénieur de recherche. Centre de recherches d'Ugine. Ugine-Savoie

Références bibliographiques

- [1] COLOMBIER (L.) et HOCHMANN (J.). – *Aciers inoxydables. Aciers réfractaires*. Dunod (1965).
- [2] LACOMBE (P.), BAROUX (B.) et BERANGER (G.). – *Les aciers inoxydables*. Les Éd. de Phys. 1 016 p. (1990).
- [3] CHARLES (J.). – *Duplex Stainless Steel's 91*. vol.1, p. 3 à 48, 28-30 oct. 1991.
- [4] ROMBEAUX (PH.). – *Traitements thermiques et résistance à la corrosion des aciers inoxydables martensitiques pour la coutellerie*. Journée ATTT/CETIM/SATS Trait. therm. et corrosion p. 1 à 9, 29 oct. 1992.
- [5] BAROUX (B.), ORLANDI (M.C.) et MAITRE-PIERRE (PH.). – *Mét. Techn.* vol. 11, p. 378 à 382, sept. 1984.
- [6] LEBRUN (J.P.). – *Applications des plasmas froids pour les traitements anti-usure*. Bulletin du cercle d'Études des matériaux, p. 29. 1 - 29. 11 (1994).
- [7] HERTZ (D.) et LEBRUN (J.P.). – *Nitruration en plasma basse pression d'aciers inoxydables austénitiques*. 9th intern. cong. on heat treatment and surf. engin. et 5th French open intern. conf. on heat treatment Nice-Acropolis (F) p. 301 à 310.
- [8] ROUX (T.), SAKER (A.), LEROY (C.), FRANTZ (C.) et MICHEL (H.). – *Mécanismes de nitruration à basse température des aciers inoxydables austénitiques dans les plasmas azote-hydrogène*. 9th intern. congr. on heat treatment and surf. engin. et 5th French open intern. conf. on heat treatment Nice-Acropolis (F) p. 291-299.

Dans les Techniques de l'Ingénieur

- [9] SAINT-ANTONIN (F.). – *Essais de fluage M 140*, traité Matériaux métalliques (1995).
- [10] SASSOULAS (H.). – *Traitements thermiques des aciers inoxydables M 1 155*, traité Matériaux métalliques (1997).

Normalisation

Association française de normalisation (AFNOR)

NF EN 10088-2 11-95 Aciers inoxydables. Conditions techniques de livraison des tôles et bandes pour usage général.

NF EN 10088-3 11-95

Aciers inoxydables. Conditions techniques de livraison pour les demi-produits, barres, fil machine et produits pour usage général.