321/321H, 347/347H - ACIERS INOXYDABLES AUSTÉNITIQUES

(UNS S32100, S34700, S34800)

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Les alliages ATI 321 (UNS S32100), ATI 347 (UNS S34700) et ATI 348 (UNS S34800) sont des aciers inoxydables stabilisés dont l'avantage principal est leur excellente résistance à la corrosion intergranulaire après exposition à des températures comprises entre 427 et 816°C (800 à 1500°F), plage dans laquelle les carbures de chrome précipitent.

- Le 321 est stabilisé par ajout de titane.
- Les 347 et 348 sont stabilisés par ajout de niobium (columbium) et tantale.
- L'alliage 348 présente des teneurs limitées en cobalt et en tantale pour les applications nucléaires.

Bien que les nuances 321 et 347 soient utilisées pour des expositions prolongées entre 427 et 816°C, la nuance 304L les a remplacées dans les applications impliquant uniquement le soudage ou un chauffage de courte durée.

Les nuances 321 et 347 présentent également de meilleures propriétés mécaniques à haute température que le 304 et le 304L, notamment en fluage et en rupture sous contrainte. Cela permet d'obtenir des contraintes admissibles plus élevées selon le code ASME des chaudières et récipients sous pression. La température maximale d'utilisation selon ce code est de 816°C (1500°F).

Des versions à teneur élevée en carbone sont disponibles :

- 321H : UNS S32109
- 347H : UNS S34709

FORMES DE PRODUITS

Les inox 321 et 347 sont disponibles sous forme de :

- Tôles fortes (plates),
- Tôles minces (sheets),
- Feuilles (strips).
- Produits longs

RÉSISTANCE À LA CORROSION

Corrosion Générale

Les alliages 321 et 347 possèdent une résistance à la corrosion générale comparable à celle du 304 inoxydable non stabilisé. Toutefois :

- Le 321 recuit est légèrement moins résistant dans les environnements fortement oxydants.
- Le 347 est généralement préféré pour les environnements aqueux et à basse température.
- Une exposition prolongée entre 427 et 816°C dégrade davantage la résistance à la corrosion du 321 que celle du 347.

Le 347 est principalement utilisé dans les applications à haute température où une forte résistance à la sensibilisation est requise afin d'éviter la corrosion intergranulaire lors du refroidissement.

Corrosion intergranulaire

Les inox 321 et 347 sont particulièrement adaptés aux applications où les inox non stabilisés comme le 304 seraient sensibles à la corrosion intergranulaire.

Lorsque les aciers inoxydables austénitiques non stabilisés sont maintenus ou refroidis lentement entre 427 et 816°C :

- des carbures de chrome précipitent aux joints de grains ;
- certaines solutions corrosives attaquent préférentiellement ces zones ;
- le métal s'affaiblit progressivement et peut finalement se désagréger.

Les milieux organiques, les produits laitiers ou les atmosphères peu agressives provoquent rarement ce type de corrosion, même en présence de carbures précipités.

Les nuances stabilisées 321 et 347 offrent une excellente résistance à la sensibilisation et à la corrosion intergranulaire après soudage ou après exposition prolongée dans cette plage de températures.

Résultats de l'essai de corrosion intergranulaire après sensibilisation à long terme (méthode ASTM A262)			
Nuance	**Taux (ipm)**	**Pliage**	**Vitesse de corrosion (mpy)**
304	0.81	dissous	9720.0
304L	0.0013	IGA	15.6
321	0.0008	IGA	9.6
347	0.0005	AUCUNE IGA	6.0
* Recuit 1100°F, 240 heures			

L'absence d'attaque intergranulaire (IGA) sur les éprouvettes en nuance 347 démontre qu'elles ne se sont pas sensibilisées au cours de cette exposition thermique. Le faible taux de corrosion observé sur les éprouvettes en nuance 321 montre que, bien qu'une certaine attaque intergranulaire ait été constatée, cette nuance est restée plus résistante que le 304L dans les mêmes conditions. Toutes ces nuances présentent des performances nettement supérieures à celles de l'acier inoxydable 304 standard dans les conditions de cet essai.

De manière générale, les alliages 321 et 347 sont utilisés pour les équipements fortement soudés ne pouvant pas être recuits après fabrication, ainsi que pour les équipements fonctionnant entre 800 et 1500°F (427 à 816°C) ou refroidis lentement à travers cette plage de températures. L'expérience acquise dans un large éventail de conditions de service a permis de rassembler suffisamment de données pour évaluer et prévoir, dans la plupart des applications, le risque d'attaque intergranulaire. Des informations complémentaires sont également disponibles dans la section TRAITEMENT THERMIQUE.

SOUDABILITÉ

Les aciers inoxydables austénitiques sont considérés comme les plus faciles à souder parmi les aciers fortement alliés. Ils peuvent être assemblés par tous les procédés de soudage par fusion ainsi que par soudage par résistance. Deux aspects essentiels doivent être pris en compte lors de la réalisation des soudures sur les inox austénitiques : le maintien de la résistance à la corrosion et la prévention de la fissuration.

Il est important de conserver le niveau des éléments stabilisants présents dans les alliages 321 et 347 lors du soudage. L'alliage 321 est plus sensible à la perte de titane, tandis que l'alliage 347 est moins sujet à la perte de niobium (columbium). Il convient également d'éviter toute contamination par le carbone provenant des huiles ou d'autres sources, ainsi que par l'azote de l'air ambiant. Pour ces nuances stabilisées, comme pour les autres alliages austénitiques non stabilisés, il est recommandé d'appliquer des pratiques de soudage rigoureuses incluant une parfaite propreté des surfaces et une protection gazeuse inerte efficace.

Un métal fondu présentant une structure entièrement austénitique est plus susceptible de se fissurer pendant le soudage. C'est pourquoi les alliages 321 et 347 sont conçus pour se resolidifier avec une faible proportion de ferrite afin de réduire le risque de fissuration. Les aciers inoxydables stabilisés au niobium (columbium) sont généralement plus sensibles à la fissuration à chaud que ceux stabilisés au titane.

Des métaux d'apport spécifiques sont disponibles pour le soudage des inox stabilisés 321 et 347. Le métal d'apport de nuance 347 est d'ailleurs fréquemment utilisé pour le soudage de la nuance 321.

Ces alliages stabilisés peuvent également être assemblés à d'autres aciers inoxydables ou à des aciers au carbone. Pour ce type d'assemblage, on utilise couramment des métaux d'apport de type 309 (23 % Cr - 13,5 % Ni) ou des métaux d'apport à base de nickel.

COMPOSITION CHIMIQUE (% masse)

La composition de ces alliages est définie par les normes ASTM A240 et ASME SA-240.

Weight Percent Maximum Unless Range is Specified		
Élément	**321**	**347**
Carbone*	0.08	0.08
Manganèse	2.00	2.00
Phosphore	0.045	0.045
Soufre	0.030	0.030
Silicium	0.75	0.75
Chrome	17.00-19.00	17.00-19.00

Nickel	9.00-12.00	9.00-12.00
Niobium (columbium) + Tantale**	--	10×C min to 1.00 max
Tantale	--	--
Titane**	5×(C+N) min to 0.70 max	--
Cobalt	--	--
Azote	0.10	--
Fer	Balance	Balance

* Également disponible en version H, avec une teneur en carbone comprise entre 0,04 % et 0,10 %.

** Pour les nuances H, la teneur minimale requise en élément stabilisant

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Les propriétés physiques des aciers inoxydables 321 et 347 sont très similaires et peuvent, dans la pratique, être considérées comme identiques. Les valeurs présentées dans le tableau ci-dessous peuvent être appliquées aux trois nuances. Lorsqu'ils sont correctement recuits, les aciers inoxydables 321 et 347 sont constitués principalement d'austénite et de carbures de titane ou de niobium (columbium). De faibles quantités de ferrite peuvent être présentes ou non dans la microstructure. De petites quantités de phase sigma peuvent également se former lors d'une exposition prolongée à des températures comprises entre 593 et 816°C (1000 à 1500°F). Les aciers inoxydables stabilisés 321 et 347 ne peuvent pas être durcis par traitement thermique.

Le coefficient global de transfert thermique des métaux dépend de plusieurs facteurs, et pas uniquement de leur conductivité thermique. Dans la plupart des cas, les coefficients de film, la formation de calamine et l'état de surface sont tels que les aciers inoxydables ne nécessitent pas plus de 10 à 15 % de surface d'échange supplémentaire par rapport à d'autres métaux présentant une conductivité thermique plus élevée. La capacité des aciers inoxydables à conserver des surfaces propres permet souvent d'obtenir un meilleur transfert thermique que celui de certains métaux pourtant dotés d'une conductivité thermique supérieure.

Perméabilité magnétique

Les nuances stabilisées 321 et 347 sont généralement amagnétiques à l'état recuit, avec une perméabilité inférieure à 1,02. Le travail à froid peut augmenter cette valeur.

Densité		
Nuance	**g/cm³**	**lb/in³**
ATI 321	7.92	0.286
ATI 347	7.96	0.288
ATI 348	7.96	0.289

Module d'élasticité
28 x 106 psi (193 GPa)

Coefficient moyen de dilatation thermique linéaire			
Plage de température		**cm/cm °C**	**in/in °F**
°C	**°F**		
20 - 100	68 - 212	16.6×10^{-6}	9.2×10^{-6}
20 - 600	68 - 1112	18.9×10^{-6}	10.5×10^{-6}
20 -1000	68 - 1832	20.5×10^{-6}	11.4×10^{-6}

JACQUET

321/321H, 347/347H

Conductivité thermique			
Plage de température		W/m·K	Btu·in/hr·ft^2·°F
°C	°F		
20 - 100	68 - 212	16.3	112.5
20 - 500	68 - 932	21.4	147.7

Chaleur spécifique			
Plage de température		J/kg K	Btu/lb °F
°C	°F		
0 - 100	32 - 212	500	0.12

Résistivité électrique		
Plage de température		microhm·cm
°C	°F	
20	68	72
100	213	78
200	392	86
400	752	100
600	1112	111
800	1472	121
900	1652	126

Plage de fusion	
°C	°F
1398-1446	2550-2635

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

Propriétés de traction à température ambiante

Les propriétés mécaniques minimales des alliages chrome-nickel stabilisés 321 et 347 à l'état recuit à 1093°C (2000°F), refroidis à l'air, sont présentées dans le tableau ci-dessous. Les éprouvettes utilisées pour les essais ont été prélevées dans des tôles.

Propriétés de traction à température élevée

Les propriétés mécaniques typiques à température élevée des tôles et feuillards en 321 et 347 sont présentées ci-dessous. La résistance mécanique de ces alliages stabilisés est nettement supérieure à celle de l'acier inoxydable 304 non stabilisé à partir de 538°C (1000°F).

Les nuances à haute teneur en carbone 321H et 347H (UNS S32109 et UNS S34709 respectivement) présentent une résistance encore plus élevée au-dessus de 537°C (1000°F).

Les contraintes admissibles maximales de conception définies par l'ASME pour l'inox 347H reflètent cette résistance supérieure par rapport à la nuance 347 standard à plus faible teneur en carbone.

La nuance 321H n'est pas autorisée pour les applications relevant de la Section VIII du code ASME et son utilisation est limitée à des températures de 427°C (800°F) pour les applications relevant de la Section III.

Résilience

Les aciers inoxydables 321 et 347 présentent une excellente ténacité à température ambiante ainsi qu'à basses températures.

Le tableau suivant présente les valeurs de résilience Charpy V obtenues sur des éprouvettes de 347 recuit après un maintien de 1 heure à la température d'essai indiquée.

Les résultats obtenus pour l'acier inoxydable 321 peuvent être considérés comme similaires.

JACQUET

321/321H, 347/347H

Résistance au choc des alliages 321 et 347			
Température d'essai		Énergie absorbée lors de l'essai de résilience Charpy	
°C	°F	Ft-lb	Joules
75	24	90	122
-25	-32	66	89
-80	-62	57	78

Propriétés mécaniques minimales à température ambiante selon ASTM A240 et ASME SA-240						
Nuance	Limite d'élasticité Décalage de 0,2 % psi (MPa)	Résistance ultime à la traction psi (MPa)	Allongement en 2 po (%)	Dureté maximale		
				Plaque	Feuille	Bande
321	30,000 (205)	75,000 (515)	40	217 Brinell	95 Rb	95 Rb
347	30,000 (205)	75,000 (515)	40	201 Brinell	92 Rb	92 Rb

Propriétés typiques de traction à température élevée de l'alliage 321 (épaisseur de 0,036 pouce / 0,9 mm)				
Température d'essai		Limite d'élasticité Décalage de 0,2 % psi (MPa)	Résistance ultime à la traction, psi (MPa)	Allongement sur 2 po (%)
°F	°C			
68	20	31,400 (215)	85,000 (590)	55.0
400	204	23,500 (160)	66,600 (455)	38.0
800	427	19,380 (130)	66,300 (455)	32.0
1000	538	19,010 (130)	64,400 (440)	32.0
1200	649	18,890 (130)	55,800 (380)	28.0
1350	732	19,000 (130)	41,500 (285)	26.0
1500	816	17,200 (115)	26,000 (180)	45.0

Propriétés typiques de traction à température élevée de l'alliage 347 (épaisseur de 0,060 pouce / 1,54 mm)				
Température d'essai		Limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 %, psi (MPa)	Résistance ultime à la traction, psi (MPa)	Allongement en pourcentage sur 2 pouces
°F	°C			
68	20	36,500 (250)	93,250 (640)	45.0
400	204	36,600 (250)	73,570 (505)	36.0
800	427	29,680 (205)	69,500 (475)	30.0
1000	538	27,400 (190)	63,510 (435)	27.0
1200	649	24,475 (165)	52,300 (360)	26.0
1350	732	22,800 (155)	39,280 (270)	40.0
1500	816	18,600 (125)	26,400 (180)	50.0

Résistance à la fatigue

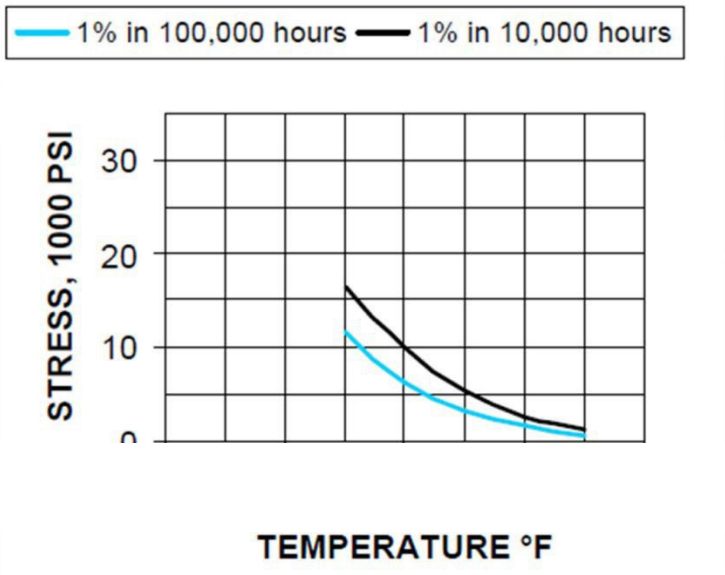
La résistance à la fatigue de pratiquement tous les métaux est influencée par plusieurs facteurs, notamment :

- les conditions corrosives de l'environnement ;
- l'état de surface ;
- la forme de la pièce ;
- la contrainte moyenne appliquée.

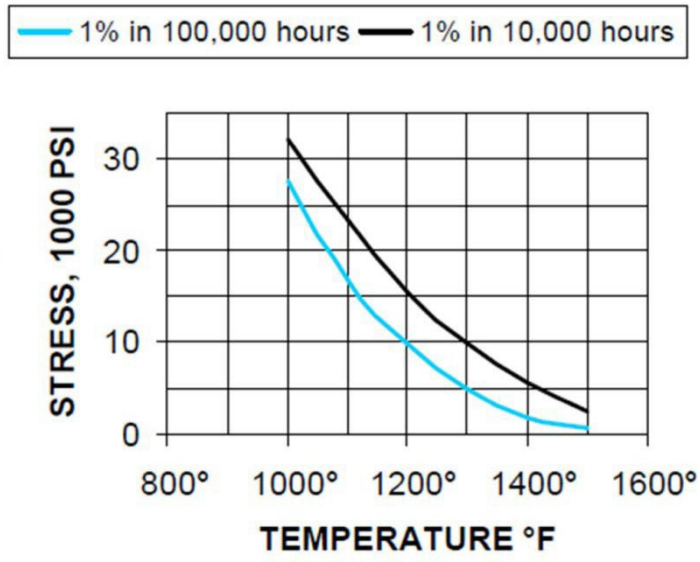
Pour cette raison, il n'est pas possible de fournir des valeurs uniques qui représenteraient fidèlement la résistance à la fatigue dans toutes les conditions de service.

Les limites d'endurance à la fatigue des aciers inoxydables 321 et 347 correspondent à environ 35 % de leur résistance à la traction.

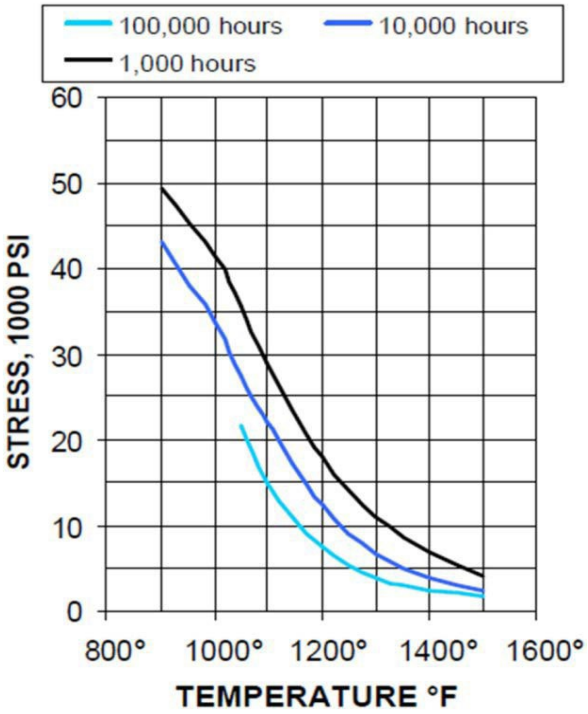
Résistance au fluage de l'alliage 321 recuit



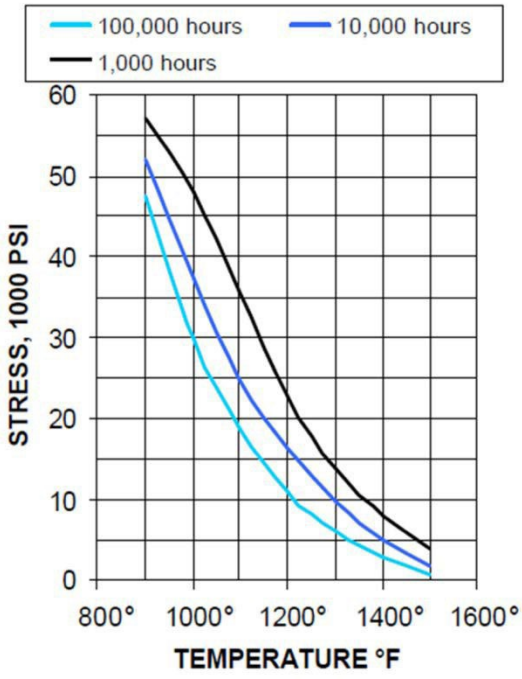
Résistance au fluage des alliages 347 et 348 recuits



Résistance à la rupture par fluage de l'alliage 321 recuit



Résistance à la rupture par fluage de l'alliage 347 recuit

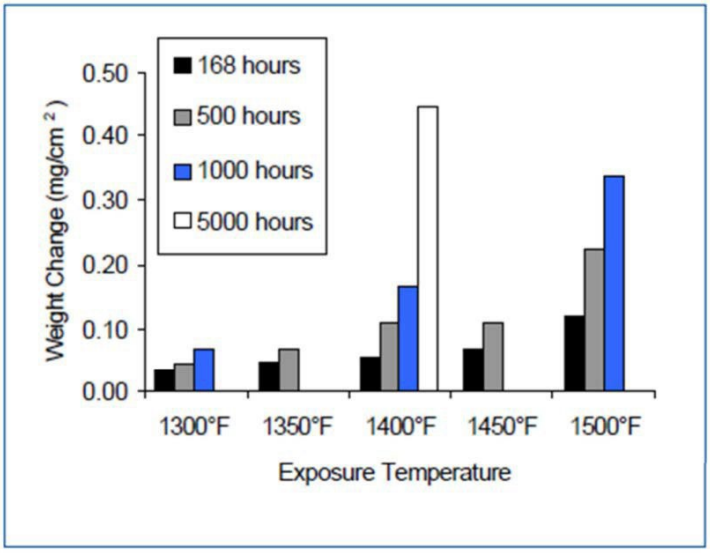


Résistance à l'oxydation

Les alliages 321 et 347 présentent une résistance à l'oxydation comparable à celle des autres aciers inoxydables austénitiques de type 18-8.

Les résultats des essais d'oxydation réalisés sur l'alliage 347 sont présentés sous forme de graphiques et de tableaux. Les éprouvettes, préparées à partir de matériaux de production standard avec finition de laminage, ont été exposées à l'air ambiant d'un laboratoire à des températures élevées.

À intervalles réguliers, les éprouvettes ont été retirées de l'environnement à haute température puis pesées afin de mesurer l'importance de la formation de calamine (oxydes de surface). Les résultats sont exprimés sous forme de variation de masse en milligrammes par centimètre carré (mg/cm²) et correspondent à la moyenne obtenue sur au moins deux éprouvettes distinctes.



Variation de masse (mg/cm²)					
Délai d'exposition	**1300°F**	**1350°F**	**1400°F**	**1450°F**	**1500°F**
168 heures	0.032	0.046	0.054	0.067	0.118
500 heures	0.045	0.065	0.108	0.108	0.221
1,000 heures	0.067	--	0.166	--	0.338
5,000 heures	--	--	0.443	--	--

Les alliages 321 et 347 se distinguent principalement par de faibles ajouts d'éléments d'alliage qui n'ont pas d'influence significative sur leur résistance à l'oxydation. Par conséquent, les résultats présentés peuvent être considérés comme représentatifs des trois nuances.

Toutefois, comme la vitesse d'oxydation peut être influencée par l'environnement d'exposition ainsi que par certains facteurs propres au produit considéré, ces résultats doivent être interprétés uniquement comme une indication générale de la résistance à l'oxydation de ces nuances. 1 and 347 alloys differ primarily by small alloying additions unrelated to factors affecting the oxidation resistance.

Fissuration par corrosion sous contrainte

Les aciers inoxydables austénitiques 321 et 347 sont sensibles à la fissuration par corrosion sous contrainte (SCC) en présence d'halogénures, de manière similaire à l'inox 304. Cette sensibilité est liée à leur teneur en nickel comparable. Les conditions favorisant la SCC sont :

1. La présence d'ions halogénures (principalement les chlorures).
2. La présence de contraintes résiduelles de traction.
3. Une température de service supérieure à environ 49°C (120°F).

Ces contraintes peuvent provenir :

- des déformations à froid lors des opérations de formage ;
- des cycles thermiques liés au soudage.

Le niveau des contraintes peut être réduit par recuit ou par traitement de détente après déformation à froid. Les alliages stabilisés 321 et 347 constituent donc un excellent choix pour les environnements où les nuances non stabilisées risqueraient de subir une corrosion intergranulaire.

Les alliages 321 et 347 sont particulièrement utiles dans les environnements susceptibles de provoquer une fissuration par corrosion sous contrainte due aux acides polythioniques, phénomène qui affecte les aciers inoxydables austénitiques non stabilisés comme le 304.

L'exposition d'un inox austénitique non stabilisé à la plage de sensibilisation entraîne la précipitation de carbures de chrome aux joints de grains. Lors du refroidissement à température ambiante dans un milieu contenant des sulfures, ceux-ci (souvent du sulfure d'hydrogène H_2S) réagissent avec l'humidité et l'oxygène pour former des acides polythioniques qui attaquent ces joints de grains sensibilisés. En présence de contraintes mécaniques, des fissures intergranulaires peuvent alors se développer.

Ce type de SCC a été observé dans les raffineries pétrolières, où les sulfures sont fréquemment présents. Les alliages stabilisés 321 et 347 constituent une solution efficace grâce à leur résistance

à la sensibilisation lors des expositions à haute température.

Pour obtenir la meilleure résistance possible, ces alliages doivent être utilisés à l'état thermiquement stabilisé lorsque les conditions de service peuvent conduire à une sensibilisation.

Corrosion par piqûres et corrosion en crevasse

La résistance des alliages stabilisés 321 et 347 à la corrosion par piqûres et en crevasse, en présence d'ions chlorure, est comparable à celle des inox 304 et 304L en raison de leur teneur similaire en chrome.

En règle générale, une concentration de 100 ppm de chlorures dans un milieu aqueux est considérée comme la limite acceptable, particulièrement en présence de crevasses.

Des concentrations plus élevées peuvent provoquer : une corrosion en crevasse ;une corrosion par piqûres.

Les alliages 321 et 347 réussissent l'essai de brouillard salin neutre à 5 % pendant 100 heures selon la norme ASTM B117, sans apparition de rouille ni de taches.

En revanche, une exposition aux embruns marins est susceptible d'entraîner des piqûres ; de la corrosion en crevasse ; une forte décoloration de la surface.

Pour cette raison, les nuances 321 et 347 ne sont pas recommandées pour les environnements marins.

Essais de fissuration sous contrainte en milieu chloruré - Alliage 321		
Essai	**Éprouvettes en U (fortement sollicitées) à 1350 °F**	
Chlorure de magnésium 42 % en ébullition	Métal de base	Fissuration après 24 à 71 h
	Soudé	Fissuration après 24 à 71 h
Chlorure de lithium 33 % en ébullition	Métal de base	Fissuration en moins de 18 h
	Soudé	Fissuration en moins de 18 h
Chlorure de sodium 26 % en ébullition	Métal de base	Aucune fissure jusqu'à 1000 h, puis fissuration avant 475 h selon les conditions de l'essai
	Soudé	Fissuration après 525 à 621 h

Traitement thermique

La plage de température de recuit recommandée pour les alliages 321 et 347 est comprise entre 928 et 1093°C (1800 à 2000°F).

Bien que l'objectif principal du recuit soit d'obtenir une bonne ductilité et un matériau plus tendre, ces aciers peuvent également être soumis à un recuit de détente dans la plage de précipitation des carbures, soit entre 427 et 816°C (800 à 1500°F), sans risque de corrosion intergranulaire ultérieure.

Une détente de quelques heures dans cette plage de température n'entraîne pas de diminution notable de la résistance générale à la corrosion. Toutefois, un maintien prolongé dans cette plage tend à réduire quelque peu cette résistance.

Il est important de souligner que le recuit entre 427 et 816°C ne rend pas ces nuances sensibles à la corrosion intergranulaire.

Pour obtenir une ductilité maximale, le recuit entre 928 et 1093°C est recommandé.

Lors de la fabrication d'équipements nécessitant une protection maximale contre la précipitation des carbures, il faut tenir compte de la différence entre l'efficacité stabilisatrice du niobium (columbium) et celle du titane. Pour cette raison, le niveau de stabilisation et la protection obtenue peuvent être légèrement moins élevés avec l'inox 321.

Lorsque la résistance maximale à la corrosion est requise, il peut être nécessaire d'effectuer sur l'inox 321 un recuit de stabilisation :

- Température : 843 à 899°C (1550 à 1650°F)
- Durée : jusqu'à 5 heures selon l'épaisseur

Cette température est suffisamment élevée pour dissoudre les carbures de chrome éventuellement formés. Elle favorise également la combinaison du titane avec le carbone pour former des carbures de titane stables et inoffensifs. Le résultat est :

- le retour du chrome en solution solide ;
- la fixation du carbone sous forme de carbures de titane stables.

Ce traitement supplémentaire est généralement moins nécessaire pour la nuance 347 stabilisée au niobium.

Lorsque les traitements thermiques sont réalisés dans une atmosphère oxydante, les oxydes doivent être éliminés après recuit au moyen d'une solution de décapage à base d'acide nitrique et d'acide fluorhydrique, suivie d'un rinçage soigneux.

Les alliages 321 et 347 ne peuvent pas être durcis par traitement thermique.

Nettoyage

Malgré leur excellente résistance à la corrosion, les aciers inoxydables nécessitent certaines précautions lors de la fabrication et de l'utilisation afin de préserver leur aspect de surface, même dans des conditions normales de service. Lors du soudage :

- les procédés sous gaz inerte sont recommandés ;
- les oxydes et laitances de soudage doivent être éliminés à l'aide d'une brosse en acier inoxydable ;
- les brosses en acier carbone sont à proscrire, car elles déposent des particules pouvant provoquer une corrosion superficielle ultérieure.

Pour les applications plus exigeantes, il est recommandé de traiter les zones soudées avec une solution de décapage à base d'acide nitrique et fluorhydrique afin d'éliminer les colorations thermiques, puis de rincer soigneusement la surface.

Pour les installations situées dans des environnements ruraux, faiblement industriels ou peu agressifs, l'entretien est généralement limité. Un simple lavage occasionnel à l'eau sous pression des zones abritées est suffisant.

Dans les environnements industriels sévères, des nettoyages plus fréquents sont recommandés afin d'éliminer les dépôts susceptibles de provoquer de la corrosion ou d'altérer l'apparence de l'acier inoxydable.

Enfin, une conception adaptée facilite considérablement le nettoyage. Les équipements présentant :

- des angles arrondis,
- des rayons de raccordement,
- l'absence de crevasses,
- des soudures meulées lisses,
- des surfaces polies,

s'entretiennent beaucoup plus facilement.