Alliage C276 - Alliage à base de nickel (UNS N10276)

INTRODUCTION

L'alliage C276 (désignation UNS N10276) est un alliage nickel-molybdène-chrome-fer-tungstène qui figure parmi les matériaux les plus résistants à la corrosion actuellement disponibles. L'alliage C276 est largement utilisé dans les environnements les plus sévères rencontrés dans les industries chimiques et pétrochimiques, les systèmes de désulfuration des gaz de combustion, l'industrie de la pâte et du papier ainsi que dans d'autres domaines spécialisés. Sa conception permet de conserver un très haut niveau de résistance à la corrosion même à l'état soudé.

L'alliage C276 possède également une bonne résistance mécanique à haute température ainsi qu'une résistance modérée à l'oxydation, bien qu'il puisse finalement former des précipités fragilisants lors d'expositions prolongées à température élevée.

Disponible depuis de nombreuses années, l'alliage C276 est utilisé dans la fabrication d'équipements relevant du Code ASME des chaudières et récipients sous pression. Il est couvert par la Section VIII, Divisions 1 et 2 de l'ASME, sous de nombreuses formes de produits.

L'alliage se fabrique facilement par soudage selon des techniques similaires à celles utilisées pour les aciers inoxydables austénitiques et les autres alliages à base de nickel. Des précautions sont toutefois nécessaires lors de la fabrication, car une augmentation des faibles teneurs en carbone et en silicium peut nuire à certaines propriétés importantes.

NORMES ET CERTIFICATIONS

L'alliage C276 est couvert par les spécifications suivantes :

Norme	Produit
ASTM B574 / ASME SB574	Produits en barres
ASTM B575 / ASME SB575	Tôles, feuilles et feuillards
ASTM B619 / ASME SB619	Tubes soudés
ASTM B622 / ASME SB622	Tubes sans soudure

JACQUET

Alliage C276

ASTM B626 / ASME SB626	Tubes soudés
ASTM B366 / ASME SB366	Raccords forgés résistants à la corrosion (WPHC276)
AWS A5.14 / ASME SA5.14	Fil de soudage (ERNiCrMo-4)

COMPOSITION CHIMIQUE TYPIQUE

Élément	% massique
Carbone	0,006
Manganèse	0,150
Phosphore	0,005
Soufre	0,002
Silicium	0,03
Chrome	15,50
Nickel	Solde*
Molybdène	16,0
Tungstène	3,50
Vanadium	0,15
Cobalt	0,10
Fer	6,00

* Par différence.

Corrosion générale

L'alliage C276 est l'un des matériaux les plus universellement résistants à la corrosion disponibles aujourd'hui. Il peut être utilisé dans des environnements allant de modérément oxydants à fortement réducteurs.
L'alliage C276 ne contient toutefois pas suffisamment de chrome pour résister efficacement aux environnements les plus fortement oxydants, tels que l'acide nitrique concentré à chaud.
Il est largement utilisé dans les procédés chimiques, en particulier lorsque des mélanges d'acides sont présents. Une application typique se situe dans les zones les plus corrosives des systèmes de désulfuration des fumées, notamment les conduits de sortie.

L'alliage C276 est également utilisé en présence de chlore humide, l'un des milieux les plus agressifs connus, auquel peu de matériaux résistent efficacement.

Il est aussi utilisé dans les laveurs de fumées des centrales thermiques au charbon où il compte parmi les matériaux les plus résistants à la corrosion.

Solution "Green Death" (à ébullition)	Vitesse de corrosion, MPY (mm/an)	
	Type 316	Alliage C276
7 % acide sulfurique + 3 % acide chlorhydrique + 1 % chlorure cuivrique + 1 % chlorure ferrique	Détruit	26.5 (0.67)

Corrosion par piqûres et corrosion en crevasse

La teneur élevée en chrome, molybdène et tungstène de l'alliage C276 lui confère une résistance exceptionnelle à la corrosion par piqûres. Son niveau de performance est tel que cet alliage est souvent considéré comme pratiquement inerte dans l'eau de mer. Il est ainsi largement utilisé dans les environnements marins, les saumures et les milieux fortement chargés en chlorures, même lorsque le pH est fortement acide.

Le tableau suivant compare les performances de l'alliage C276 à celles d'autres alliages dans une solution contenant 10 % de chlorure ferrique ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) selon la procédure ASTM G48, Méthode B. Le critère retenu est la température à laquelle débute l'attaque par corrosion en crevasse.

Alliage	Température d'apparition de la corrosion en crevasse	
	°F	°C
Type 316	27	2.5
Alliage 625	113	45
Alliage C276	140*	60*

* Généralement considéré comme au-delà de la limite de stabilité de la solution de chlorure ferrique.

Corrosion sous contrainte en présence de chlorures

Les fortes teneurs en nickel et en molybdène procurent à l'alliage C276 une résistance extrêmement élevée à la fissuration par corrosion sous contrainte induite par les chlorures.

Solution d'essai	Résultats et durée des essais (heures) pour les échantillons en U de l'alliage testé		
	Type 316	Alliage 625	Alliage C276
42 % chlorure de magnésium (à ébullition)	Rupture (24 h)	Résiste (1000 h)	Résiste (1000 h)
33 % chlorure de lithium (à ébullition)	Rupture (100 h)	Résiste (1000 h)	Résiste (1000 h)
26 % chlorure de sodium (à ébullition)	Rupture (300 h)	Résiste (1000 h)	Résiste (1000 h)

Étude indépendante de résistance à la corrosion

Afin de vérifier que l'alliage C276 actuellement produit possède les mêmes caractéristiques de résistance à la corrosion que l'alliage d'origine, une campagne d'essais a été réalisée par un laboratoire indépendant : Corrosion Testing Laboratories Inc. (CTL), Wilmington, Delaware.

Des éprouvettes provenant de trois coulées différentes d'alliage C276 ont été testées dans trois solutions corrosives distinctes. Les éprouvettes ont été évaluées à l'état recuit et décapé. Dans le cas de la troisième solution, des éprouvettes soudées bout à bout ont également été soumises aux essais afin de reproduire les conditions rencontrées dans le traitement des déchets nucléaires.

Les résultats ont confirmé que l'alliage C276 présente une résistance à la corrosion équivalente à celle de l'alliage initialement développé et qu'il est parfaitement adapté aux environnements de service pour lesquels il est spécifié.

Solution 1 : ASTM G28-85, Méthode A

Cet essai représente un test standard d'acceptation à la corrosion utilisé par de nombreux grands groupes de l'industrie chimique ainsi que par des organismes gouvernementaux pour évaluer la sensibilité d'un matériau à l'attaque intergranulaire (IGA).
Le critère généralement reconnu par l'industrie pour différencier un matériau sensible à l'attaque intergranulaire d'un matériau résistant est un taux de corrosion maximal de 480 mils par an (MPY).
Les résultats présentés ci-dessous démontrent que l'alliage C276 possède une excellente résistance à l'attaque intergranulaire.

Environnement d'essai (ébullition) G28-85, méthode A, 24 h	Vitesse de corrosion uniforme (MPY) – État recuit en continu et décapé		
	Alliage C276		
	Coulée ACO (0,062")	Coulée ACV (0,250")	Coulée ADB (0,266")
Sulfate ferrique 50 % d'acide sulfurique	250	200	220

Solution 2: ASTM G28, Méthode B

Cette solution d'essai constitue également un test d'acceptation destiné à déterminer la sensibilité à l'attaque intergranulaire. Elle est particulièrement utile pour vérifier que le matériau fourni possède la composition correcte et une structure métallurgique appropriée, exempte de précipités de phases secondaires nuisibles.

Des vitesses de corrosion supérieures à 60 MPY seraient considérées comme inacceptables.

Une fois encore, les résultats démontrent l'excellente résistance de l'alliage C276 à l'attaque intergranulaire.

Environnement d'essai (Ébullition) G28-85, Méthode B, 24 h	Vitesse de corrosion uniforme (MPY) – État recuit en continu et décapé		
	Alliage C276		
	Coulée ACO (0,062")	Coulée ACV (0,250")	Coulée ADB (0,266")
23 % acide sulfurique + 1,2 % acide chlorhydrique + 1,0 % chlorure ferrique + 1,0 % chlorure cuivrique	45	43	48

Solution 3:

La solution dite « 3 B-2 » contient :

- 0,25 % de chlorures sous forme de chlorure de sodium (NaCl)
- 0,03 % de fluorures sous forme de fluorure de sodium (NaF)
- 0,003 % d'iodures sous forme d'iodure de sodium (NaI)
- 0,08 % de sulfates sous forme de sulfate de sodium (Na_2SO_4)
- 0,10 % de nitrates sous forme de nitrate de sodium ($NaNO_3$)
- 0,10 % de mercure sous forme de chlorure mercurique ($HgCl_2$)

Le pH est ajusté à 2,2 à l'aide d'acide sulfurique.

L'essai est réalisé au point d'ébullition de la solution pendant 10 jours.
Cette solution a été conçue pour simuler les conditions de service rencontrées dans les installations de traitement des déchets nucléaires, notamment dans la conduite d'évacuation des gaz et le réservoir de stockage des condensats du vitrificateur du site du Savannah River Plant du Département de l'Énergie des États-Unis (DOE), situé à Aiken, en Caroline du Sud.
Plus de 1 000 tonnes d'alliage UNS N10276 (Alloy C-276) ont été utilisées pour ce projet, en raison de son excellente résistance à la corrosion dans cet essai :

- vitesse de corrosion inférieure à 1,5 mil/an (mpy) ;
- faible sensibilité à la corrosion en crevasse, avec une profondeur inférieure à 1 mil (0,025 mm) au cours de l'essai de 10 jours.

L'alliage C-276 a une nouvelle fois démontré son excellente résistance à la corrosion, comme l'illustrent les résultats ci-dessous.

Vitesses de corrosion uniforme (MPY) - Solution « 3 B-2 »			
Coulée (Heat)	**Épaisseur éprouvette**	**Recuit usine + décapé**	**Soudé***
ACO	0.062"	0.0	0.0
ACV	0.250"	0.1 CC 0.020 mm	0.0
ADB	0.266"	0.2	0.1

CC = corrosion en crevasse (Crevice Corrosion)

CC = 0,020 mm signifie une attaque maximale en crevasse de 0,020 mm après 10 jours d'essai.

* Éprouvettes soudées bout à bout avec métal d'apport AWS ERNiCrMo-4, selon le procédé GTAW (TIG) standard.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Densité

0.321 lb/in^3

8.90 g/cm^3

Masse volumique relative

8.90

Perméabilité magnétique

1.02

Chaleur spécifique

0.102 Btu/lb/°F

425 Joules/kg/°K

Résistivité électrique

130 microhm-cm à 70°F (21°C)

Module d'élasticité à 21°C (70°F)

29.8 x 106 psi (205 GPa)

Coefficient de dilatation thermique linéaire			
Valeurs moyennes entre 70°F (21°C) et la température indiquée		Coefficient de dilatation	
°F	°C	10^{-6}in/in/°F	10^{-6}cm/cm/°C
200	93	6.2	11.2
400	204	6.7	12.0
600	316	7.1	12.8
800	427	7.3	13.2
1000	538	7.4	13.4

Température		Conductivité thermique	
°F	°C	Btu/h•ft•°F	W/m•K
-270	-168	4.2	7.3
-100	73	5.0	8.7
70	21	5.9	10.2
200	93	6.4	11.0
400	204	7.5	13.0
600	316	8.7	15.1
800	427	9.8	17.0
1000	538	11.0	19.0

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

Les propriétés mécaniques à température ambiante sont généralement spécifiées comme suit :

Propriétés minimales (ASTM B575)

JACQUET

Alliage C276

Limite d'élasticité minimale à 0,2 % (psi / MPa)	Résistance à la traction minimale (psi / MPa)	Allongement minimum (% sur 2")	Dureté maximale (Rb)
41 000 (283)	100 000 (690)	40	100

La mesure de dureté est donnée à titre indicatif uniquement. Les propriétés typiques de traction à court terme en fonction de la température sont présentées ci-dessous. Le matériau testé a été recuit à 2100°F (1150°C) puis trempé à l'eau.

Température °F	°C	Limite d'élasticité à 0,2 % (ksi)		Résistance à la traction Ksi	(MPa)	Allongement (% in 2")
-320	-196	82	(565)	140	(965)	45
150	101	70	(480)	130	(895)	50
70	21	60	(415)	115	(790)	50
200	93	55	(380)	105	(725)	50
400	204	50	(345)	103	(710)	50
600	316	46	(315)	98	(675)	55
800	427	42	(290)	95	(655)	60
1000	538	39	(270)	93	(640)	60

Écrouissage à froid

La résistance mécanique du matériau peut être augmentée par déformation à froid. Les propriétés typiques des tôles et feuillards à température ambiante en fonction du pourcentage de réduction à froid sont indiquées ci-dessous.

Réduction à froid	Limite d'élasticité à 0,2 % (ksi)		Résistance à la traction ksi	(MPa)	Allongement (% in 2")
0	60	(415)	115	(790)	50
10	90	(620)	129	(890)	40
20	125	(860)	145	(1,000)	30
30	155	(1,070)	168	(1,160)	15
40	180	(1,240)	194	(1,340)	10
50	195	(1,345)	210	(1,450)	7

Résilience aux chocs

Les valeurs de résilience Charpy V obtenues sur des éprouvettes de pleine épaisseur (10 mm) prélevées dans une tôle recuite sont présentées ci-dessous.

Les échantillons soudés avec un métal d'apport de composition équivalente devraient également présenter un comportement ductile dans la même plage de températures, bien que les valeurs puissent être légèrement inférieures en raison de la nature même du joint soudé.

Température d'essai		Résilience Charpy V	
°F	°C	ft-lbs	Joules
-320	-196	180	245
70	21	240	325
392	200	240	325

Aptitude au formage

Alloy L'alliage C-276 peut être mis en forme de manière similaire aux aciers inoxydables austénitiques standards. Cependant, il est nettement plus résistant mécaniquement que les inox austénitiques conventionnels et nécessite donc des efforts plus importants pour être déformé.
Lors des opérations de travail à froid, l'écrouissage est plus rapide que celui observé sur les inox austénitiques classiques. La combinaison :

- d'une résistance mécanique initiale élevée ;
- d'un fort taux d'écrouissage ;

peut nécessiter des recuits intermédiaires lorsque les déformations à froid sont importantes.

Soudabilité

L'alliage C-276 possède des caractéristiques de soudage similaires à celles des aciers inoxydables austénitiques. Lors du choix du procédé de soudage, il convient de privilégier les techniques limitant toute dégradation de la résistance à la corrosion.

Les procédés suivants sont recommandés :

- GTAW (TIG)
- GMAW (MIG)
- Électrode enrobée (SMAW)
- Soudage par résistance

Ces procédés minimisent les altérations de la résistance à la corrosion du métal soudé et de la zone affectée thermiquement (ZAT).

Le soudage oxyacétylénique est déconseillé en raison du risque d'enrichissement en carbone provenant de la flamme d'acétylène.

Les flux de soudage sous flux contenant du carbone ou du silicium sont également à éviter car ils peuvent contaminer le métal déposé.

Afin de limiter les risques de fissuration à chaud, l'apport thermique doit être maintenu au niveau minimum compatible avec une bonne pénétration.

Conception des assemblages soudés

Le choix du type de joint doit être conforme aux bonnes pratiques de soudage décrites dans le Code ASME des chaudières et récipients sous pression.

Préparation des bords

L'usinage mécanique des chanfreins est la méthode privilégiée pour obtenir un ajustement correct avant soudage.
Le cisaillement provoque un écrouissage des bords ; il est donc recommandé de meuler les bords cisaillés avant soudage.

Traitement thermique après soudage

Pour la plupart des applications corrosives, l'alliage C-276 peut être utilisé directement à l'état soudé.
Pour les environnements les plus sévères, un traitement de mise en solution est recommandé afin d'obtenir la résistance maximale à la corrosion.

Traitement thermique

Tous les produits laminés en alliage C-276 sont fournis à l'état traité en solution.

Ce traitement consiste à :

- chauffer entre 1040 et 1150°C (1900 à 2100°F) ;
- refroidir rapidement.

Pour obtenir une résistance optimale à la corrosion, l'alliage C-276 doit être refroidi de la température de mise en solution jusqu'à l'état noir (« black heat ») en moins de deux minutes.
Les traitements de détente des contraintes ne sont pas considérés comme efficaces pour cet alliage. Lorsqu'un traitement de détente serait envisagé pour d'autres matériaux, il convient ici de réaliser un recuit complet.

JACQUET

Alliage C276

Avant tout traitement thermique, le matériau doit être parfaitement propre et exempt :

- de graisse ;
- d'huile ;
- ou de toute autre source potentielle de carbone.

Décapage et nettoyage

L'obtention de la résistance maximale à la corrosion de l'alliage C-276 nécessite une surface parfaitement propre.
Les oxydes formés lors du recuit ou du soudage ont tendance à appauvrir localement le chrome à proximité immédiate de l'interface métal/oxyde.
Pour cette raison, il est nécessaire d'utiliser des traitements chimiques capables d'éliminer une fine couche métallique sous les oxydes de surface.
En raison de sa forte teneur en éléments d'alliage, le décapage du C-276 peut être difficile.
La procédure recommandée est :

- Brossage avec une brosse inox ou sablage léger.
- Immersion dans un mélange d'acide nitrique et d'acide fluorhydrique.
- Rinçage abondant à l'eau.

Applications courantes

L'alliage C-276 est largement utilisé dans les secteurs suivants :

- Industrie du papier et de la pâte à papier (digesteurs et cuves de blanchiment)
- Laveurs de gaz, agitateurs et ventilateurs humides dans les installations de désulfuration des fumées
- Équipements et composants pour gaz acides
- Réacteurs pour la production d'acide acétique
- Refroidisseurs d'acide sulfurique
- Production de méthylène diphényl diisocyanate (MDI)
- Fabrication et traitement d'acide phosphorique contaminé
- Substrats pour supraconducteurs haute température.