Alliage 625 - Superalliage à base de nickel (UNS N06625)

INTRODUCTION

L'alliage 625 (désignation UNS N06625) est un superalliage austénitique à base de nickel offrant une excellente résistance à l'oxydation et à la corrosion dans une large gamme d'environnements corrosifs, notamment ceux rencontrés dans les moteurs à réaction ainsi que dans de nombreuses applications des secteurs aéronautique et de la transformation chimique. L'alliage présente une résistance mécanique et une ténacité remarquables depuis les températures cryogéniques jusqu'à 2000°F (1093°C). L'alliage 625 possède également une résistance exceptionnelle à la fatigue.

L'alliage 625 tire sa résistance mécanique du durcissement par solution solide apporté par le molybdène et le niobium (columbium) dans la matrice nickel-chrome. Ces éléments contribuent également à son excellente résistance à la corrosion. Bien qu'il ait été développé à l'origine pour sa résistance à haute température, sa composition fortement alliée lui confère également une excellente résistance à la corrosion générale dans un grand nombre de milieux oxydants et non oxydants. Les teneurs élevées en chrome et en molybdène assurent une excellente résistance à la corrosion par piqûres induite par les chlorures, tandis que la forte teneur en nickel lui procure une excellente résistance à la fissuration par corrosion sous contrainte en présence de chlorures.

Le matériau possède un haut degré de formabilité et présente une meilleure soudabilité que de nombreux alliages fortement alliés à base de nickel. Il résiste à la corrosion intergranulaire même à l'état soudé.

L'alliage 625 peut être produit par fusion sous vide à induction ou par affinage AOD (Argon Oxygen Decarburization). Des opérations de refusion par électrode consommable peuvent également être utilisées afin d'améliorer encore la pureté métallurgique du matériau.

L'alliage 625 est disponible sous forme de :

- tôles fortes (plates),
- tôles (sheets),
- feuillards (strips),
- produits longs (barres et autres produits laminés).

L'alliage est généralement fourni à l'état recuit conformément aux spécifications applicables.

JACQUET

Alliage 625

SPÉCIFICATIONS

L'alliage 625 est couvert par les spécifications suivantes :

Forme du produit	AMS	ASTM	ASME
Pièces moulées	5401	-	-
Pièces moulées	5402	-	-
Tubes sans soudure ou soudés	5581	-	-
Tôles, feuillards et plaques	5599	B443	SB-443
Barres, pièces forgées et bagues	5666	-	-
Fil de soudage	5837	-	-
Tubes et tuyaux sans soudure	-	B444	SB-444
Barres et ronds	-	B446	SB-446
Tubes soudés	-	B704	SB-704
Tuyaux soudés	-	B705	SB-705
Raccords	-	B366	SB-366

ANALYSE CHIMIQUE TYPIQUE

Elément	%
Carbone	0,05
Manganèse	0,30
Phosphore	0,010
Soufre	0,003
Silicium	0,25
Chrome	22,0
Nickel	Solde
Molybdène	9,0
Niobium + Tantale	3,5
Titane	0,3
Aluminium	0,3
Fer	4,0

JACQUET

Alliage 625

RÉSISTANCE À LA CORROSION ET À L'OXYDATION

La teneur élevée en chrome et en molybdène de l'alliage 625 lui confère une excellente résistance à la corrosion par piqûres et à la corrosion en crevasse dans les milieux contaminés par les chlorures, tels que :

- l'eau de mer,
- les sels neutres,
- les saumures.

Données typiques dans les solutions contenant des chlorures

Essai de corrosion en crevasse dans une solution à 10 % de chlorure ferrique	Type 316	Alliage 625
Température d'apparition de l'attaque selon la procédure ASTM G-48	<32 (<0)	104-113 (40-45)

Exposition de panneaux en eau de mer

Emplacement du panneau	Type 316	Alliage 625
Eau de mer en circulation	Attaque en crevasse après 1 mois	Aucune attaque après 18 mois
Zone de marée	Attaque en crevasse après 1 mois	Aucune attaque après 18 mois
Enterrement partiel dans la vase	Attaque en crevasse après 1 mois	Aucune attaque après 18 mois

L'alliage résiste à une grande variété de milieux corrosifs, allant des environnements fortement oxydants aux environnements modérément réducteurs.
Des essais réalisés dans des saumures géothermiques ont montré que l'alliage 625 possède une excellente résistance aux fluides géothermiques chauds, comparable à celle de l'acier inoxydable AL 29-4-2® et du Titane Grade 2.
Des essais menés dans des environnements simulant les systèmes de désulfuration des gaz de combustion ont également démontré que l'alliage 625 présente une résistance très élevée à la corrosion, supérieure à celle du type 316 et comparable à celle de l'alliage nickel C-276.

JACQUET

Alliage 625

Les données suivantes sont données à titre indicatif. Les vitesses de corrosion sont exprimées en mils par an (MPY) avec l'équivalent en mm/an entre parenthèses.

Solutions d'acides organiques à ébullition

Alliage	Acide formique 45 %	Acide oxalique 10 %	Acide formique 88 %	Acide acétique 99 %
Alliage 625	5,0 (0,13)	6,0 (0,15)	9,0 (0,23)	0,4 (0,01)
Type 316	11 (0,28)	40 (1,02)	9,0 (0,23)	2,0 (0,05)

Acides réducteurs dilués - Solutions à ébullition*

Alliage	Acide sulfurique 1 %	Acide sulfurique 5 %	Acide sulfurique 10 %	Acide chlorhydrique 1 %
Alliage 625	2,2 (0,06)	8,9 (0,23)	25,3 (0,64)	36,3 (0,92)
Type 316	25,8 (0,65)	107 (2,72)	636 (16,2)	226 (5,74)

* Les éprouvettes destinées aux essais dans l'acide sulfurique ont été activées avant les essais, tandis que celles testées dans l'acide chlorhydrique ont été évaluées sans activation préalable.

Divers environnements corrosifs

Environnement	Alliage 625	Type 316
Acide phosphorique 20 %	0,36 (<0,01)	0,2 (<0,01)
Acide sulfamique 10 %	4,80 (0,12)	63,6 (1,61)
Bisulfate de sodium 10 %	3,96 (0,10)	41,6 (1,06)

Résistance à la fissuration par corrosion sous contrainte en présence de chlorures

Essai	Alliage 625	Type 316	Alliage 20
Chlorure de magnésium 42 %	Aucune fissuration après 1000 h	Fissuration en moins de 24 h	Fissuration en moins de 100 h
Chlorure de sodium 26 %	Aucune fissuration après 1000 h	Fissuration après environ 600 h	Aucune fissuration après 1000 h

Résistance à l'oxydation

L'alliage 625 possède une excellente résistance à l'oxydation et à la formation de calamine à des températures pouvant atteindre 2000°F (1093°C). Il surpasse de nombreux autres alliages destinés aux hautes températures lors de cycles répétés de chauffage et de refroidissement. Le graphique suivant compare la perte de masse de plusieurs alliages inoxydables à celle de l'alliage 625 lors d'essais d'oxydation cyclique réalisés à 1800°F (982°C).

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Constantes physiques

Density, lb./in.^{3}	0.305
g/cm^3	8.44
Specific Gravity	8.44
Melting Range, °F	2350-2460
°C	1280-1350
Specific Heat, Btu/lb. °F	0.098
Joules/kg•K	410
Magnetic Permeability, 75°F, 200 oersted	1.0006

Résistivité électrique

Température		Résistivité électrique microhm–cm
°F	°C	
70	21	128.9
100	38	129.6
200	93	131.9
400	204	133.9
600	316	134.9
800	427	135.9
1000	538	137.9
1200	649	137.9
1400	760	136.9
1600	871	135.9
1800	982	134.9
2000	1093	133.9

JACQUET

Alliage 625

Propriétés thermiques

Température		Coefficient moyen de dilatation thermique linéaire ($\times 10^{-6}$)		Conductivité thermique (b)(c)	
°F	°C	/°F	/°C	Btu- ft/ft^2	W/m•K
-250	-157	–	–	4.2	7.3
-200	-129	–	–	4.3	7.4
-100	-73	–	–	4.8	8.3
0	-18	–	–	5.3	9.2
70	21	–	–	5.7	9.9
100	38	–	–	5.8	10.0
200	93	7.1	12.8	6.3	10.7
400	204	7.3	13.1	7.3	12.6
600	316	7.4	13.3	8.2	14.2
800	427	7.6	13.7	9.1	15.7
1000	538	7.8	14.0	10.1	17.5
1200	649	8.2	14.8	11.0	19.0
1400	760	8.5	15.3	12.0	20.8
1600	871	8.8	15.8	13.2	22.8
1700	927	9.0	16.2	–	–
1800	982	–	–	14.6	25.3

(a) Coefficient moyen mesuré entre 21°C (70°F) et la température indiquée.
(b) Mesures réalisées au Battelle Memorial Institute.
(c) Matériau recuit à 1149°C (2100°F).

JACQUET

Alliage 625

Modules élastiques

Température		Module de rigidité (G)		Module d'élasticité (E)		Coefficient de Poisson (a) (μ)
°F	°C	10^6 psi	GPa	10^6 psi	GPa	
70	21	11.4	79	29.8	205	0.308
200	93	11.2	77	29.2	200	0.310
400	204	10.8	75	28.4	195	0.312
600	316	10.5	72	27.5	190	0.313
800	427	10.1	70	26.6	185	0.312
1000	538	9.7	67	25.6	175	0.321
1200	649	9.2	63	24.4	170	0.328
1400	760	8.7	60	23.1	160	0.329
1600	871	8.2	57	–	–	–

(a) Poisson's ratio (μ) computed from the relation:

$$\mu = \frac{E-2G}{2G}$$

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

Propriétés de traction à température ambiante

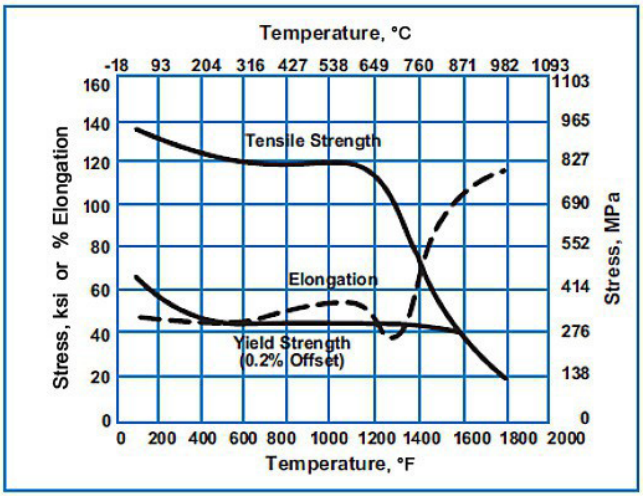
Les propriétés typiques à température ambiante d'un matériau recuit à 1065°C (1920°F) sont les suivantes :

Limite d'élasticité (0,2 %)	Résistance à la traction	Allongement (% in 2")
63,000 psi (430 MPa)	136,000 psi (940 MPa)	51.5

Les propriétés typiques à température ambiante d'un matériau mis en solution à 1177°C (2150°F) sont :

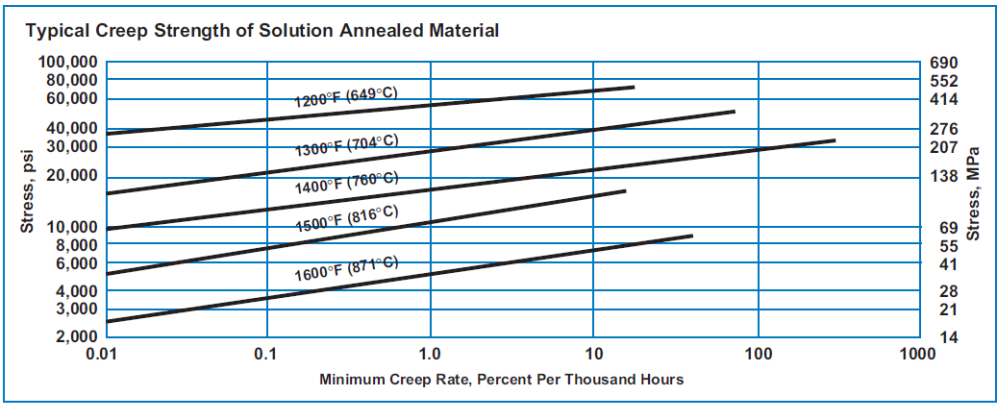
Limite d'élasticité (0,2 %)	Résistance à la traction	Allongement (% in 2")
49,500 psi (340 MPa)	115,500 psi (800 MPa)	67

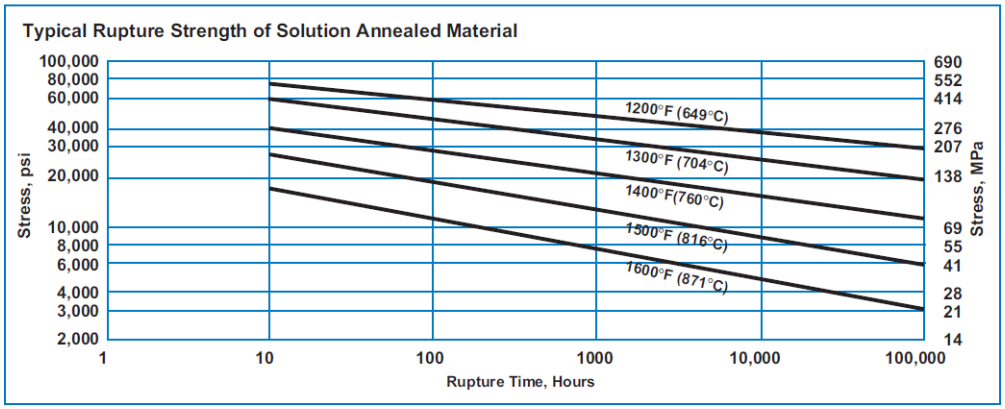
Les propriétés de traction à chaud à court terme de l'alliage 625 recuit à 1066°C (1950°F) sont présentées dans le graphique d'origine.



Fluage et rupture sous contrainte

Les valeurs typiques de résistance au fluage et à la rupture de l'alliage 625 à l'état mis en solution (voir section Traitement thermique) sont présentées dans les courbes du document





d'origine.

Résistance aux chocs

L'alliage 625 conserve une excellente résilience même à très basse température.

Propriétés Charpy typiques de l'alliage 625

Température d'essai		Orientation	Énergie absorbée (a)	
°F	°C		Ft-lbs	Joules
85	30	Longitudinal	49	66
85	30	Transversale	49	66
-110	- 79	Longitudinal	44	60
-110	- 79	Transversale	41.5	56
-320	-196	Longitudinal	35	47
-320	-196	Transversale	35	47

(a) Éprouvettes Charpy à encoche en trou de serrure, moyenne de 3 essais.

Les propriétés d'impact peuvent diminuer après une exposition prolongée entre 649 et 871°C (1200 à 1600°F).

RÉSISTANCE À LA FATIGUE

La limite d'endurance à température ambiante d'une tôle laminée à froid et recuite en usine à 1066°C (1950°F), testée en flexion alternée complète, est de :

315 MPa (46 000 psi)

soit environ 35 % de sa résistance à la traction.

Les essais en flexion rotative à charge constante donnent une estimation plus élevée de la limite de fatigue :

environ 65 % de la résistance à la traction.

Cette valeur plus élevée est influencée par le comportement d'écrouissage de l'alliage 625.

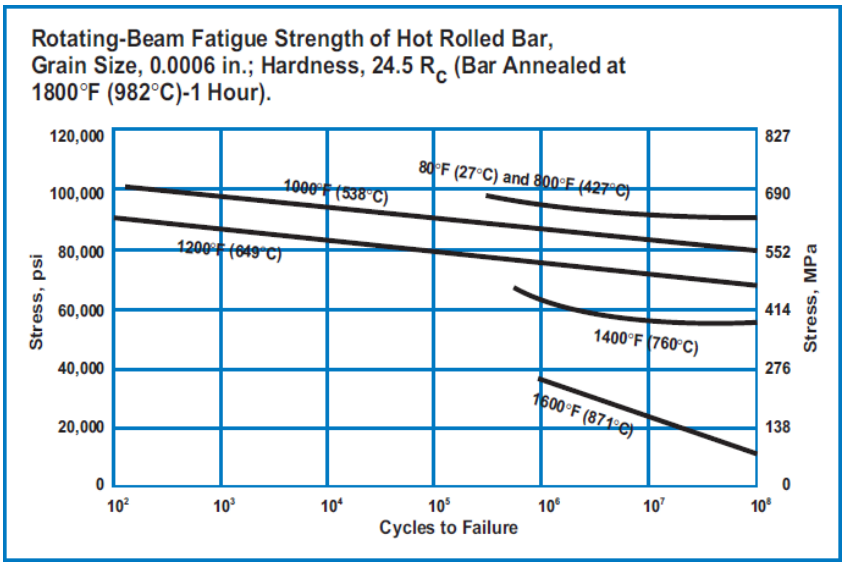
APTITUDE AU FORMAGE

L'alliage 625 peut être mis en forme de manière similaire aux aciers inoxydables austénitiques standards.Toutefois :

- il présente une résistance mécanique nettement plus élevée ;
- il nécessite donc des efforts de formage plus importants ;

- il s'écrouit plus rapidement durant le travail à froid.

Pour les déformations importantes, des recuits intermédiaires peuvent être nécessaires.



Effet de l'écrouissage sur les propriétés d'une tôle recuite à 1177°C (2150°F)

Réduction à froid	Dureté	Limite élastique MPa		Résistance à la traction MPa		Allongement %	Réduction à froid
		psi	(MPa)	psi	(MPa)		
0	88Rb	49,500	341	115,500	796	67.0	60.4
5	94Rb	77,500	534	121,000	834	58.0	58.1
10	25	102,500	707	130,000	896	47.5	54.6
15	32	112,500	776	137,000	945	39.0	51.9
20	34	125,000	862	143,000	986	31.5	50.0
30	36	152,000	1048	165,000	1137	17.0	49.3
40	39	167,000	1151	179,500	1238	12.5	41.9
50	40	177,000	1220	189,500	1307	8.5	38.0
60	44	180,500	1245	205,000	1413	6.5	32.7
70	45	201,000	1386	219,000	1510	5.0	25.4

SOUDAGE

L'alliage 625 se soude facilement par les procédés habituellement utilisés pour les aciers inoxydables austénitiques :

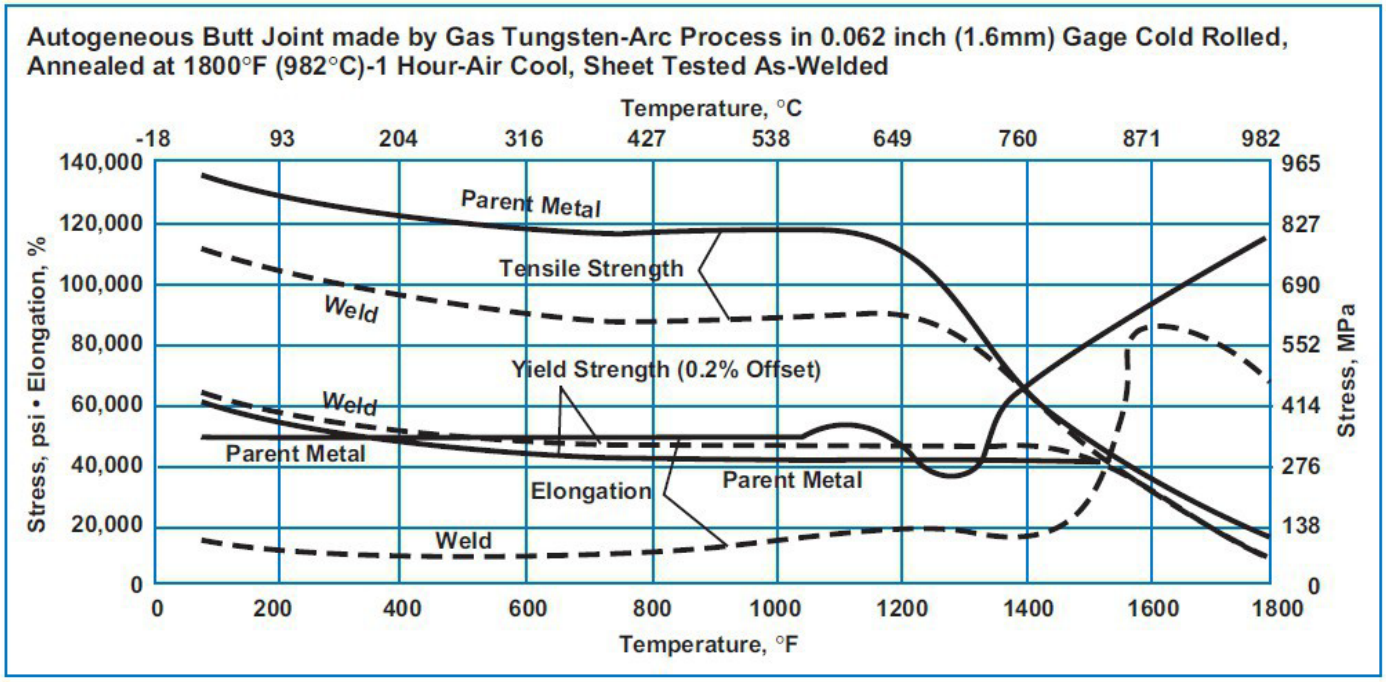
- soudage par fusion ;
- soudage par résistance.

Le matériau doit être :

- à l'état recuit usine ;
- complètement décapé et nettoyé avant soudage.

Aucun préchauffage n'est nécessaire.

Aucun traitement thermique après soudage n'est requis pour conserver ou restaurer la résistance à la corrosion.



TRAITEMENT THERMIQUE

L'alliage 625 est fourni selon deux conditions de traitement thermique :

Pour les températures de service ≤ 649°C (1200°F)
Recuit standard à : 871°C minimum (1600°F)

Pour les températures de service > 649°C (1200°F)
Recuit de mise en solution à :1093°C minimum (2000°F)

Lorsque des performances optimales de fluage et de rupture à chaud sont recherchées, ce traitement est privilégié.

Un recuit de stabilisation complémentaire à : 982°C minimum (1800°F)

peut parfois être spécifié afin d'améliorer encore la résistance à la sensibilisation.

Applications courantes - Grade 1

- Équipements pour la production d'acide superphosphorique
- Installations de traitement des déchets radioactifs
- Tubulures et revêtements de colonnes montantes pour la production pétrolière
- Industrie offshore et équipements exposés à l'eau de mer
- Réseaux de tuyauterie marine dans la construction navale
- Compensateurs résistants à la fissuration par corrosion sous contrainte
- Revêtements de fours industriels
- Tubes pour centrales géothermiques.