

Raex[®] ABRASION
RESISTANT STEEL

SOUDAGE ET DÉCOUPE THERMIQUE



LA SOLUTION POUR TOUS VOS BESOINS DE RÉSISTANCE À L'USURE

L'acier anti-abrasion Raex est conçu pour les structures en acier soumises à une usure abrasive. Ses propriétés de résistance à l'abrasion prolongent considérablement la durée de vie des équipements, vous faisant gagner du temps et de l'argent.

Raex prolonge la durée de vie des structures en acier grâce à son poids, plus léger que celui des aciers doux. Avec des composants plus légers, vous augmentez la charge utile, vous limitez les trajets, vous économisez du carburant et vous diminuez les émissions de carbone.

INTRODUCTION

Raex est un acier anti-abrasion facile à travailler, qui présente une bonne dureté. Les techniques de production modernes permettent d'obtenir, à moindre coût, un acier de qualité assurant une protection fiable contre différents types d'usure. Les aciers Raex sont livrés en tôles fortes et tôles découpées en longueur, avec une dureté de 300 à 500 HB. Raex est particulièrement adapté à la découpe, au soudage et au pliage, ce qui facilite le travail en atelier. Il prolonge la durée de vie des machines, élargit les possibilités de conception et permet de créer des produits légers avec un meilleur rendement énergétique.

APPLICATIONS POUR LES ACIERS ANTI-ABRASION RAEX

- Broyeurs, godets et lames
- Plateformes et structures de base
- Matériaux et machines de traitement des déchets, réservoirs et convoyeurs
- Silos, trémies, cribleurs et mélangeurs
- Containers spéciaux
- Pièces d'usure et lames de découpe

L'alliage et le durcissement des aciers anti-abrasion Raex les rendent particulièrement résistants à l'usure. Ils se distinguent des aciers de construction ordinaires par leur alliage, leur dureté et leur haute limite d'élasticité. Ils demandent donc des conditions de découpe thermique et de soudage plus strictes. Pour souder un acier anti-

abrasion, il faut s'assurer : d'éviter la fissuration à froid, en particulier lors du soudage de tôles fortes, et d'optimiser les propriétés mécaniques du joint soudé. Ces exigences s'appliquent au métal de base, mais d'autres critères peuvent être requis, comme par exemple le niveau de qualité attendu pour la soudure. Lors d'une découpe thermique, il est impératif d'éviter les fissures en surface et le ramollissement excessif de la zone de découpe.

Cette brochure technique fournit des instructions pratiques pour le soudage des nuances Raex 400, Raex 450 et Raex 500 et présente les caractéristiques spécifiques relatives à la découpe thermique. Le soudage exige une température de fonctionnement et un apport thermique corrects, ainsi qu'une préparation minutieuse. Les surfaces des rainures à souder doivent être propres et sèches. Lors du travail d'un acier à ultra haute limite d'élasticité, la teneur en hydrogène dissous dans le métal soudé doit rester très faible. Pour ce faire, il convient d'utiliser des paramètres de soudage corrects et des consommables de soudage appropriés. La fiche technique fournit des recommandations concernant les consommables à utiliser pour le soudage à l'arc avec protection, le soudage manuel à l'arc métallique et le soudage à l'arc submergé. Pour obtenir un résultat optimal, toutes les étapes du soudage et de la découpe thermique doivent être scrupuleusement suivies, de la conception à la finition.



SOMMAIRE

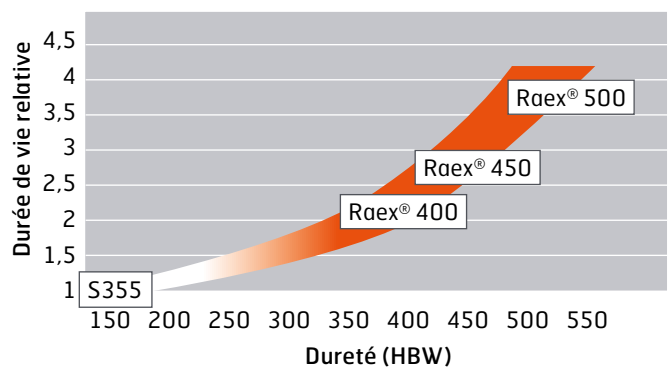
INTRODUCTION	3
1 NUANCES D'ACIER ANTI-ABRASION	4
2 APTITUDE AU SOUDAGE DES ACIERS ANTI-ABRASION	5
2.1 Sensibilité à la fissuration à froid	5
2.1.1 Emplacement des fissures à froid	5
2.1.2 Facteurs provoquant la fissuration à froid	5
2.1.2.1 Microstructure d'un joint soudé	5
2.1.2.2 Teneur critique en hydrogène dans un joint soudé	6
2.1.2.3 Résistance mécanique et niveau de contrainte dans un joint soudé	6
2.1.2.4 Effet combiné des trois facteurs	6
2.2 Propriétés optimales d'un joint soudé	6
3 PARAMÈTRES DE SOUDAGE ET CONSÉQUENCES SUR LES PROPRIÉTÉS D'UN JOINT SOUDÉ	7
3.1 Paramètres de soudage les plus importants	7
3.2 Effet des paramètres de soudage sur les propriétés d'un joint soudé	7
4 CONSOMMABLES DE SOUDAGE	8
4.1 Consommables de soudage ferritiques tendres ou de qualité inférieure	8
5 PRÉVENTION DE LA FISSURATION À FROID	10
5.1 Contrôle du durcissement de la microstructure d'un joint soudé	10
5.2 Contrôle de la teneur en hydrogène	10
5.3 Élimination des contraintes résiduelles dans un joint soudé	10
5.4 Conseils pratiques pour le soudage	10
5.5 Soudage à une température de fonctionnement correcte	10
6 OBTENTION D'UNE COMBINAISON OPTIMALE DE PROPRIÉTÉS DANS LES JOINTS SOUDÉS	12
6.1 Paramètres de soudage recommandés	12
6.2 Zone tendre dans les joints soudés	12
7 TRAITEMENT THERMIQUE	13
8 COMPORTEMENTS DE L'ACIER LORS D'UNE DÉCOUPE THERMIQUE	14
8.1 Procédure de découpe thermique	14
8.2 Contrôle de la dureté de surface avec la température de fonctionnement	14
8.3 Prévention du ramollissement lors d'une découpe thermique	14
8.4 Conseils pratiques pour la découpe thermique	14

1 NUANCES D'ACIER ANTI-ABRASION

L'acier anti-abrasion Raex est conçu pour les structures en acier soumises à une usure abrasive. Ses propriétés de résistance à l'abrasion prolongent considérablement la durée de vie des équipements, vous faisant gagner du temps et de l'argent. Les nuances d'acier disponibles sont Raex 300, Raex 400, Raex 450 et Raex 500. La dureté moyenne de ces aciers est respectivement de 300/400/450/500 HBW (figure 1).

La résistance de l'acier à l'usure abrasive est proportionnelle à sa dureté. La figure 1 montre la durée de vie relative des aciers Raex 400, Raex 450 et Raex 500 lors d'un test d'abrasion. Toutefois, il ne faut pas oublier que l'usure dépend de plusieurs facteurs et peut varier en fonction des cas.

FIGURE 1. RAEX 400, RAEX 450 ET RAEX 500. TEST D'ABRASION.



Allongement relatif de la durée de vie en fonction de la dureté de l'acier. La valeur de référence 1 indique ici la durée de vie d'un acier de construction ordinaire S355.

2 APTITUDE AU SOUDAGE DES ACIERS ANTI-ABRASION

L'alliage et la trempe entraînent la haute limite d'élasticité et la dureté des aciers anti-abrasion. Seul un alliage adéquat permet d'obtenir une bonne aptitude au durcissement. Du fait de leur alliage particulier, les aciers anti-abrasion demandent des conditions de soudage plus strictes que les aciers de construction ordinaires. Les deux principales contraintes à prendre en compte sont les suivantes :

- Éviter les fissures à froid au niveau des joints soudés.
- Préserver les propriétés optimales au niveau des joints soudés.

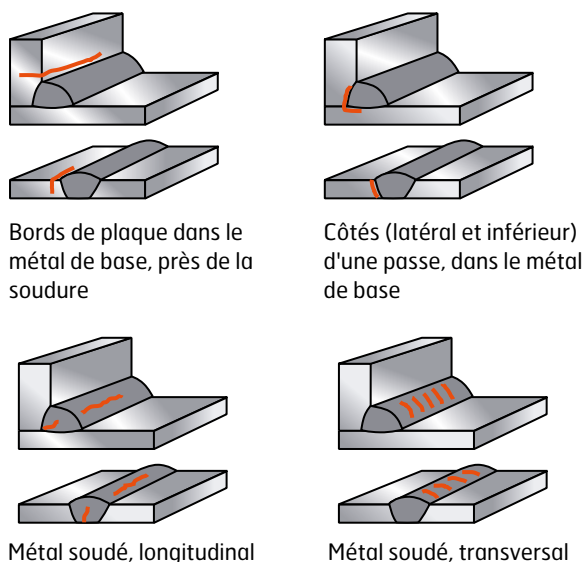
2.1 SENSIBILITÉ À LA FISSURATION À FROID

La fissuration à froid est un phénomène courant qui peut affecter l'aptitude au soudage des aciers anti-abrasion. Les fissures à froid se forment généralement quand la température de la soudure chute à +150 °C ou en-dessous, d'où le terme de « fissure à froid ». La fissuration à froid est également appelée fissuration hydrogène ou fissuration retardée. Les fissures provoquées par l'hydrogène apparaissent parfois plusieurs jours après le soudage. Lors de la planification des contrôles non destructifs (CND) de la structure soudée, il faut donc prendre en compte ce délai pour une éventuelle apparition de fissures à froid.

2.1.1 Emplacement des fissures à froid

La figure 2 montre les zones critiques d'apparition des fissures (au niveau du métal soudé, de la ligne de fusion et de la zone affectée par la chaleur).

FIGURE 2. ZONES SENSIBLES AUX FISSURATIONS À FROID AU NIVEAU DES JOINTS SOUDÉS DES ACIERS ANTI-ABRASION À HAUTE LIMITE D'ÉLASTICITÉ.



2.1.2 Facteurs provoquant la fissuration à froid

La fissuration à froid est la conséquence de l'effet combiné de trois facteurs simultanés. Ces facteurs sont, comme indiqué dans la figure 3, 1) la microstructure du joint soudé, 2) la teneur en hydrogène du joint soudé et 3) le niveau de contraintes dans le joint soudé.

2.1.2.1 Microstructure d'un joint soudé

Pour assurer une bonne résistance à l'usure, les microstructures du métal de base, du métal soudé et de la zone affectée par la chaleur d'un joint soudé doivent être martensitiques. Si le joint refroidit trop vite, la martensite devient trop dure et perd en résistance. Une telle microstructure est sensible à la fissuration. Pour représenter la capacité de durcissement de l'acier et du métal soudé, on utilise des formules de carbone équivalent basées sur l'alliage. Les formules « CEV » et « CET » présentées ci-dessous sont couramment utilisées pour les aciers anti-abrasion. L'abréviation « CE » est parfois utilisée à la place de CEV.

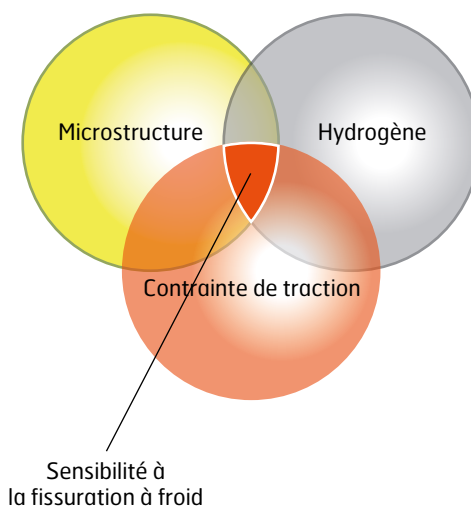
Formules de carbone équivalent utilisées pour représenter la capacité de durcissement de l'acier et du métal soudé.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Mo + Cr + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15}$$

$$CET = C + \frac{(Mn + Mo)}{10} + \frac{(Cr + Cu)}{20} + \frac{Ni}{40}$$

Plus le carbone équivalent ou la capacité de durcissement augmente, plus la microstructure est dure.

FIGURE 3. LA SENSIBILITÉ À LA FISSURATION À FROID D'UN JOINT SOUDÉ EST LA CONSÉQUENCE DE L'EFFET COMBINÉ DE TROIS FACTEURS.



2.1.2.2 Teneur critique en hydrogène dans un joint soudé

L'hydrogène est un gaz très léger qui se dissout dans l'acier sous forme d'atomes et de molécules. Lors de la fabrication des plaques d'acier, de petites quantités d'hydrogène sont déjà présentes dans la matière. Le processus de fabrication Raex est tel que la teneur naturelle en hydrogène des plaques d'acier reste relativement faible. C'est donc pendant le soudage que l'hydrogène est susceptible de pénétrer dans le joint depuis l'extérieur de la plaque d'acier, provoquant une sensibilité à la fissuration à froid.

La teneur critique en hydrogène n'est pas une constante. Sa valeur varie en fonction de la microstructure de l'acier. Selon le niveau de température et l'état du traitement, la microstructure de l'acier anti-abrasion est martensitique, ferritique ou austénitique. Dans une microstructure martensitique ou ferritique, seules de très petites quantités d'hydrogène sont dissoutes. Dans une microstructure austénitique, la quantité peut être bien supérieure.

Pendant le soudage, la majeure partie de l'hydrogène est dissoute dans l'acier à des températures élevées, produisant une microstructure d'acier austénitique. Quand le joint soudé refroidit, la microstructure de l'acier devient ferritique ou martensitique. Dans ces microstructures, seule une petite quantité d'hydrogène est dissoute et l'espace disponible pour le déplacement physique des atomes d'hydrogène est limité. Les atomes d'hydrogène qui se retrouvent piégés dans la microstructure du joint soudé provoquent alors localement des tensions internes qui forment des fissures. Ce phénomène est appelé fissuration à froid.

2.1.2.3 Résistance mécanique et niveau de contrainte de traction dans un joint soudé

Le soudage et les autres opérations sur la plaque produisent des contraintes au niveau du joint. La résistance mécanique et les contraintes résiduelles d'un joint soudé reposent principalement sur la résistance du métal soudé. Les contraintes résiduelles dépendent de la résistance du métal d'apport et de la rigidité de la structure, ainsi que de l'épaisseur de la tôle d'acier. Au point le plus élevé, la contrainte dans le joint soudé est équivalente au point d'élasticité de l'acier. Une contrainte élevée augmente la sensibilité à la fissuration à froid.

2.1.2.4 Effet combiné des trois facteurs

L'apparition de fissures à froid est provoquée par des facteurs interdépendants : la microstructure, la teneur en hydrogène et la contrainte de traction dans un joint soudé. Par exemple, au cours d'une même procédure de soudage, si le niveau de contrainte de traction d'un joint augmente, une teneur réduite en hydrogène ne suffit pas à éviter la fissuration à froid. De même, une résistance plus élevée et une microstructure plus fragile prédisposent à la fissuration, même si les teneurs en hydrogène sont plus faibles. Pour éviter les fissurations à froid, vous devez prévoir l'effet combiné de ces trois facteurs et planifier le soudage en conséquence.

2.2 PROPRIÉTÉS OPTIMALES D'UN JOINT SOUDÉ

Les propriétés exigées pour les aciers anti-abrasion sont moins nombreuses que pour les aciers de construction classiques, mais particulières. Il en va de même pour les joints soudés et les structures réalisées à partir d'aciers anti-abrasion. Lors de la planification du soudage d'aciers anti-abrasion, vous devez vérifier que le joint est conforme aux propriétés présentées dans le tableau 1.

Dans les structures résistant à l'usure, les soudures doivent être positionnées le plus loin possible des zones soumises aux charges les plus lourdes. Pour que la résistance à l'usure du joint soudé soit optimale, vous devez utiliser des consommables de soudage haute résistance et un alliage adapté. Pour obtenir une valeur de résistance aux chocs des joints soudés équivalente à celle du métal de base, vous devez utiliser des consommables résistants et des paramètres de soudage adaptés.

Les propriétés répertoriées dans le tableau 1 sont interdépendantes. L'augmentation de la dureté et de la résistance mécanique, par exemple, a pour effet de diminuer la résistance aux chocs. Pour optimiser les propriétés de la zone de soudure, vous devez utiliser les paramètres de soudage appropriés et la température de fonctionnement recommandée. Les valeurs des propriétés des joints soudés des aciers anti-abrasion ne sont généralement pas indiquées, à l'exception de la dureté et, plus rarement, de la résistance mécanique. Habituellement, ces propriétés ne sont pas testées.

TABLEAU 1. COMBINAISON OPTIMALE DES PROPRIÉTÉS AU NIVEAU DES JOINTS SOUDÉS DES ACIERS ANTI-ABRASION.

Combinaison des propriétés
Dureté
Résistance à l'usure
Résistance mécanique
Résistance aux chocs

3 PARAMÈTRES DE SOUDAGE ET CONSÉQUENCES SUR LES PROPRIÉTÉS D'UN JOINT SOUDÉ

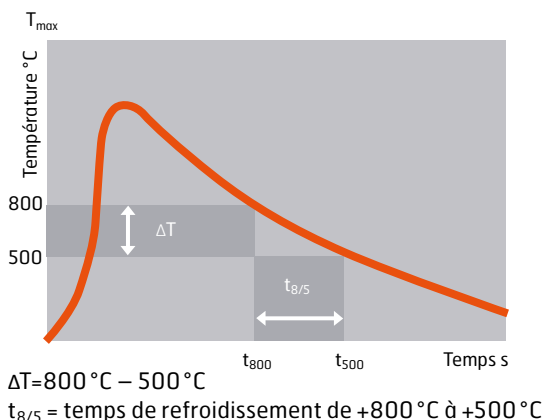
Pendant le soudage, l'acier subit un fort effet thermique. La température du joint augmente rapidement pour passer de la température de fonctionnement à la température de l'acier liquide, supérieure à +1500 °C. L'apport thermique du soudage et la vitesse de refroidissement du joint sont les principales variables de contrôle de la procédure de soudage.

3.1 PARAMÈTRES DE SOUDAGE LES PLUS IMPORTANTS
Deux concepts permettent d'indiquer la quantité d'énergie thermique utilisée pour le soudage : l'apport thermique (Q) et l'énergie d'arc (E). La relation entre l'apport thermique et l'énergie de soudage est représentée par le coefficient d'efficacité thermique spécifique de la procédure de soudage « k ». À son point le plus haut, k=1, auquel cas l'efficacité thermique est de 100 % et toute l'énergie de l'arc est utilisée pour cet apport thermique. Les paramètres et variables de soudage les plus importants sont indiqués dans la figure 4. L'efficacité thermique type des méthodes utilisées pour le soudage des aciers anti-abrasion est indiquée dans le tableau 2.

3.2 EFFET DES PARAMÈTRES DE SOUDAGE SUR LES PROPRIÉTÉS D'UN JOINT SOUDÉ
L'apport thermique et la vitesse de refroidissement d'un joint sont directement liés. Avec un apport thermique élevé, le joint refroidit lentement, tandis qu'avec un apport thermique faible, il refroidit rapidement. Pour la microstructure de la zone affectée par la chaleur (ZAT) d'un joint soudé, le plus important est le temps de refroidissement de +800 °C à +500 °C, c'est-à-dire $t_{8/5}$ (figure 5). Les facteurs qui influent sur la vitesse de refroidissement d'un joint soudé sont indiqués dans le tableau 3.

Les effets d'un apport thermique plus ou moins élevé sur le soudage des aciers anti-abrasion sont indiqués dans la figure 6. Un apport thermique élevé se traduit par un temps $t_{8/5}$ long, tandis qu'un apport faible se traduit par un temps $t_{8/5}$ court.

FIGURE 5. SCHEMA DE L'ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE ET DE LA DURÉE D'UNE OPÉRATION DE SOUDAGE.



Lors d'un soudage à l'arc, l'apport thermique a pour effet d'accroître l'efficacité du soudage. Lors du soudage de plaques fines résistantes à l'abrasion, l'apport thermique est limité car il diminue la dureté de l'acier.

TABLEAU 2. EFFICACITÉ THERMIQUE TYPE POUR DIFFÉRENTES MÉTHODES DE SOUDAGE.

Méthode de soudage	Efficacité thermique, k
Soudage manuel à l'arc métallique, méthodes MAG	0,8
Soudage manuel à l'arc	0,8
Soudage à l'arc sous flux en poudre	1
Soudage à l'arc au plasma et soudage TIG	0,6

TABLEAU 3. FACTEURS QUI INFLUENT SUR LA VITESSE DE REFROIDISSEMENT D'UN JOINT SOUDÉ.

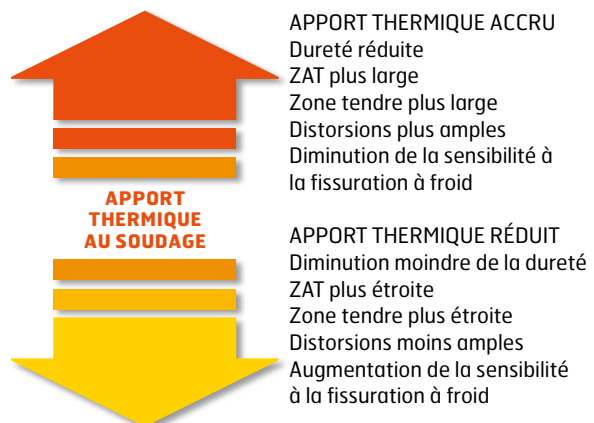
Énergie de soudage
Épaisseur(s) de plaque
Forme du joint
Type de préparation du joint
Température de fonctionnement
Séquence de soudage

FIGURE 4. APPORT THERMIQUE LORS DU SOUDAGE, ÉNERGIE DE SOUDAGE ET AUTRES VARIABLES DE SOUDAGE.

$$Q = \frac{k \times 60 \times U \times I}{1000 \times v} \quad E = \frac{60 \times U \times I}{1000 \times v}$$

$Q = k \times E$
 Q = Apport thermique, c'est-à-dire quantité de chaleur transmise pendant le soudage à la soudure par unité de longueur (kJ/mm)
 E = Énergie d'arc, c'est-à-dire énergie transmise par la procédure de soudage par unité de longueur (kJ/mm)
 k = Efficacité thermique, c'est-à-dire relation entre apport thermique (Q) et énergie d'arc (E)
 U = Tension (V)
 I = Courant (A)
 v = Vitesse de soudage (mm/min)

FIGURE 6. ACIERS ANTI-ABRASION. EFFETS DE L'APPORT THERMIQUE SUR L'APTITUDE AU SOUDAGE.



4 CONSOMMABLES DE SOUDAGE

Les consommables de soudage ferritiques de qualité inférieure sont utilisés pour le soudage des aciers de construction S355 ordinaires. Ces consommables sont couramment utilisés pour les aciers anti-abrasion et sont recommandés pour toutes les catégories de dureté.

Les consommables austénitiques de qualité inférieure sont principalement conçus pour le soudage des aciers inoxydables austénitiques. Ils constituent le meilleur choix pour les aciers anti-abrasion et les tôles fortes les plus durs, ainsi que pour le soudage de réparation.

4.1 CONSOMMABLES DE SOUDAGE FERRITIQUES TENDRES OU DE QUALITÉ INFÉRIEURE

Lors du soudage des aciers anti-abrasion, la teneur en hydrogène des consommables ferritiques accroît fortement la sensibilité à la fissuration à froid. Il est donc préférable de maintenir la teneur en hydrogène des consommables ferritiques au plus bas, soit $HD \leq 5 \text{ ml/100 g}$ (teneur en hydrogène de classe H5).

Un consommable de soudage est défini comme de qualité inférieure s'il produit un métal soudé pur fondamentalement plus tendre que le métal de base. La limite d'élasticité du métal soudé pur produit par un métal d'apport de qualité inférieure est d'environ 500 MPa et sa résistance est bonne. Nous vous recommandons d'utiliser un métal d'apport de qualité inférieure à faible teneur en hydrogène pour le soudage des aciers anti-abrasion. Il présente de nombreux avantages (tableau 4).

TABLEAU 4. AVANTAGES DES CONSOMMABLES DE SOUDAGE DE QUALITÉ INFÉRIEURE PAR RAPPORT AUX CONSOMMABLES À HAUTE RÉSISTANCE.

Avantages
Bonnes propriétés de soudage
Large choix et bonne disponibilité
Rentabilité à l'achat et en cours d'utilisation
Niveau de contrainte inférieur dans la soudure
Consommable de soudage résistant et ductile tolérant bien les contraintes
Carbone équivalent inférieur et, respectivement, aptitude au durcissement réduite
Diminution de la sensibilité à la fissuration à froid
Meilleure tolérance à l'hydrogène qu'un consommable de soudage à plus haute résistance
Besoin d'accroissement de la température de fonctionnement réduit par rapport aux consommables de soudage à plus haute résistance

Les consommables ferritiques de qualité inférieure, recommandés pour les processus de soudage courants, sont répertoriés dans les tableaux 5a et 5b.

TABLEAU 5a. RAEX 400/450/500. CONSOMMABLES DE SOUDAGE FERRITIQUES DE QUALITÉ INFÉRIEURE. CLASSIFICATION EN.

Marques similaires ou proches (Esab). Limite d'élasticité du métal soudé pur max. environ 500 MPa. Le « X » dans la norme remplace un ou plusieurs marquages de spécification.

MAG soudage fil plein (métal soudé)	MAG soudage fourré à flux: fil fourré à poudre métallique	MAG soudage fourré à flux: fil fourré à flux rutile	Soudage à l'arc sous flux en poudre : fil + flux	Soudage manuel à l'arc métallique
EN ISO 14341: G 46 X OK Autrod 12,64 (G 46 3 M G4Si1, G 42 2 C G4Si1) OK AristoRod 12,63 (G 46 4 M G4Si1, G 42 2 C G4Si1))	EN ISO 17632: T 46 X PZ6102 (T 46 4 M M 2 H5)	EN ISO 17632: T 46 X OK Tubrod 15,14 (T 46 2 P M 2 H5, T 46 2 P C 2 H5)	EN ISO 14171 S 46X OK Autrod 12,32+ OK Flux 10,71 (S 46 4 AB S3Si)	EN ISO 2560: E 46 X OK 55 (E 46 5 B 32 H5)
EN ISO 14341: G 42 X OK Autrod 12,51 (G 42 3 M G3Si1, G 38 2 C G3Si1)	EN ISO 16834: T 42 X OK Tubrod 14,12 (T 42 2 M M 1 H10, T 42 2 M C 1 H10)		EN 756 S 38 X OK Autrod 12,22+ OK Flux 10,71 (S 38 4 AB S2Si)	EN ISO 2560: E 42 X OK 48 (E 42 4 B 42 H5)

TABLEAU 5b. RAEX 400/450/500. CONSOMMABLES DE SOUDAGE FERRITIQUES DE QUALITÉ INFÉRIEURE. CLASSIFICATION AWS.

Marques similaires ou proches (Esab). Limite d'élasticité du métal soudé pur max. environ 500 MPa.
Le « X » dans la norme remplace un ou plusieurs marquages de spécification.

MAG soudage fil plein	MAG soudage fourré à flux: fil fourré à poudre métallique	MAG soudage fourré à flux: fil fourré à flux rutile	Soudage à l'arc sous flux en poudre : fil + flux	Soudage manuel à l'arc métallique
AWS A5,18 ER70S-X	AWS A5,18 E70C-X	AWS A5,20 E71T-X	AWS A5,17 F7X	AWS A5,1 E7018X
OK Autrod 12,51 (ER70S-6)	OK Tubrod 14,12 (E70C-6M, E70C-6C)	OK Tubrod 15,14 (E71T-1, E71T-1M)	OK Autrod 12,22+ OK Flux 10,71 (F7A5-EM12K)	OK 48 (E7018)
OK AristoRod 12,63 (ER70S-6)	PZ6102 (E70C-6M H4)			OK 55 (E7018-1)

TABLEAU 6. AVANTAGES ET CARACTÉRISTIQUES DES CONSOMMABLES INOXYDABLES LORS DU SOUDAGE DES ACIERS ANTI-ABRASION.

Bonnes propriétés de soudage
Choix et disponibilité
Prix d'achat élevé
Faible niveau de contrainte de la soudure
Consommable de soudage très dur et ductile
Microstructure austénitique qui dissout l'hydrogène sans sensibilité à la fissuration à froid
En général, accroître la température de fonctionnement est inutile
Résistance aux contraintes de soudure

TABLEAU 7a. RAEX 400/450/500. EXEMPLES DE CONSOMMABLES DE SOUDAGE AUSTÉNITIQUES DE QUALITÉ INFÉRIEURE. CLASSIFICATION EN.

Marques similaires ou proches (Esab). Classe de résistance du métal soudé pur max. environ 500 MPa.
Le « X » dans la norme remplace un ou plusieurs marquages de spécification.

MIG soudage fil plein	MIG soudage fourré à flux: fil fourré à poudre métallique	MAG soudage fourré à flux: fil fourré à flux rutile	Soudage à l'arc sous flux en poudre : fil + flux	Soudage manuel à l'arc métallique
EN 12072: G 18 8 Mn	EN 12073: T 18 8 Mn X	EN 12073: T 18 8 Mn X EN 14700: T Fe 10	EN 12072: S 18 8 Mn	EN 1600: E 18 8 MnX
OK Autrod 16,95 (G 18 8 Mn)	OK Tubrod 15,34 (T 18 8 Mn M M 2)	OK Tubrodur 14,71 (T Fe 10)	OK Autrod 16,97 (S18 8 Mn) + OK Flux 10,93	OK 67,45 (E 18 8 Mn B 4 2)

TABLEAU 7b. RAEX 400/450/500. EXEMPLES DE CONSOMMABLES DE SOUDAGE AUSTÉNITIQUES DE QUALITÉ INFÉRIEURE. CLASSIFICATION AWS.

Marques similaires ou proches (Esab). Classe de résistance du métal soudé pur max. environ 500 MPa.
Le « X » dans la norme remplace un ou plusieurs marquages de spécification.

MIG soudage fil plein	MAG soudage fourré à flux, fil fourré à poudre métallique	MAG soudage fourré à flux, fil fourré à flux rutile	Soudage à l'arc submergé sous flux en poudre Fil + flux	Soudage manuel à l'arc métallique
AWS 5,9 ER307	AWS 5,9 EC307	AWS 5,22 EC307T-x	AWS 5,9 ER307	AWS 5,4 E307-X
OK Autrod 16,95 (ER307)	OK Tubrod 15,34	OK Tubrodur 14,71	OK Autrod 16,97+ OK Flux 10,93	OK 67,45

5 PRÉVENTION DE LA FISSURATION À FROID

Pour éviter la fissuration à froid, la quantité d'hydrogène pénétrant dans le joint soudé doit rester faible. L'utilisation de méthodes de soudage et de consommables ayant une faible teneur en hydrogène permet de rester en-dessous du niveau critique. Par ailleurs, vous devez respecter les instructions de soudage spécifiques à Raex. La vitesse de refroidissement doit être adaptée au soudage, ce qui implique d'utiliser une température de fonctionnement et un apport thermique corrects. Pour un soudage à plusieurs passes, la température entre les passes doit être suffisamment élevée. Plus la dureté de l'acier et l'épaisseur de la plaque augmentent, plus la sensibilité à la fissuration à froid est élevée. Une plaque qui a été stockée au froid doit être portée à température ambiante (+20°C) avant de procéder au soudage et à toute autre mise en œuvre de la plaque.

5.1 CONTRÔLE DU DURCISSEMENT DE LA MICROSTRUCTURE D'UN JOINT SOUDÉ

La microstructure martensitique permet d'obtenir une bonne résistance à l'usure. Si le joint refroidit trop vite après le soudage, cela peut accroître la dureté et diminuer la ductilité de la martensite dans le métal soudé et/ou la zone de soudure affectée par la chaleur. Il est possible d'éviter la fissuration à froid en limitant le durcissement de la microstructure à l'aide des paramètres de soudage appropriés. La valeur de carbone équivalent indique l'aptitude au durcissement de l'acier et des consommables de soudage.

5.2 CONTRÔLE DE LA TENEUR EN HYDROGÈNE

Pour éviter la fissuration à froid, vous devez maintenir au plus bas le niveau d'hydrogène dans le consommable et la zone affectée par la chaleur. Nous vous recommandons d'utiliser une méthode de soudage et des consommables à faible teneur en hydrogène pour obtenir une teneur en hydrogène maximale de 5 ml/100 g. L'utilisation de consommables adéquats permet d'obtenir un faible niveau d'hydrogène. C'est le cas du soudage manuel à l'arc métallique (MAG) avec fil plein et fil fourré à flux, du soudage à l'arc submergé et du soudage à l'arc métallique manuel avec tiges revêtues de base. Lors de la sélection, de l'utilisation et du stockage de consommables, il convient de respecter les instructions des fabricants.

L'humidité à la surface de la rainure, ainsi que la poussière et les contaminants comme la graisse ou la peinture, accroissent le risque de pénétration de l'hydrogène dans le joint soudé. Pour minimiser la fissuration à froid, la surface de la rainure doit rester complètement sèche et propre avant et pendant le soudage.

5.3 ÉLIMINATION DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES DANS UN JOINT SOUDÉ

Pour éviter la fissuration à froid, il convient d'éliminer les contraintes résiduelles dans les joints soudés des aciers Raex. Pour y parvenir, le plus simple est d'utiliser des consommables ferritiques ou austénitiques de qualité inférieure. Certaines techniques de soudage permettent également d'éliminer les contraintes. Lors du soudage de plaques fines, notamment, nous vous conseillons d'optimiser la taille de la soudure et d'éviter les soudures inutilement larges. La température doit rester uniforme dans les différentes parties de la structure à toutes les étapes du soudage. Nous vous recommandons de placer la structure à souder sur un support et de la maintenir en place pendant l'opération de pointage ou de soudage.

5.4 CONSEILS PRATIQUES POUR LE SOUDAGE

Les conseils pour éliminer les contraintes résiduelles et améliorer la résistance de la structure soudée sont répertoriés dans le tableau 8.

5.5 SOUDAGE À UNE TEMPÉRATURE DE FONCTIONNEMENT CORRECTE

Pour obtenir une vitesse de refroidissement du joint soudé appropriée, vous devez utiliser une température de fonctionnement adéquate et un apport thermique suffisant. Vous éviterez ainsi la fissuration à froid.

Pour déterminer la bonne température de fonctionnement, prenez en compte les facteurs suivants :

- Nuance d'acier et valeur carbone équivalent associée.
- Épaisseur de la plaque combinée.
- Apport thermique.
- Teneur en hydrogène du consommable de soudage.
- Valeur de carbone équivalent des consommables de soudage.
- Niveau de résistance des consommables de soudage.
- Type de consommable de soudage (ferritique / austénitique).

Plus le carbone équivalent, la dureté et l'épaisseur de plaque de la nuance d'acier sont élevés, plus la température de fonctionnement doit être augmentée. Les valeurs type de carbone équivalent des aciers Raex sont indiquées dans leurs fiches techniques respectives. Elles varient en fonction des épaisseurs de la plaque. Les valeurs de carbone équivalent spécifiques à chaque plaque figurent sur les certificats des matières. Vous pouvez les utiliser pour la préparation d'un plan de soudage détaillé.

Les températures de fonctionnement recommandées pour Raex 400, Raex 450 et Raex 500 sont indiquées dans la figure 7. Les recommandations sont basées sur la norme EN 1011-2. Les températures de fonctionnement s'appliquent aux consommables ferritiques de qualité inférieure ayant une teneur en hydrogène maximale de 5 ml/100 g. Pour augmenter la température de fonctionnement, on utilise généralement le préchauffage. Lors d'un soudage à plusieurs passes, l'énergie apportée au joint par une passe suffit parfois à maintenir la bonne température de fonctionnement nécessaire à la passe suivante, de sorte qu'il est inutile d'augmenter la température par un apport externe. La température de fonctionnement recommandée pour le soudage à plusieurs passes correspond à la température entre les passes minimale. La température entre les passes ne peut pas être inférieure à la température de fonctionnement recommandée et ne doit pas dépasser +220 °C. Plus la teneur en hydrogène générée par la méthode de soudage est faible, moins il est nécessaire d'augmenter la température de fonctionnement.

Lors de l'utilisation de consommables avec une teneur en hydrogène HD>5 ml/100 g, la température de fonctionnement doit être supérieure aux valeurs indiquées dans le tableau. Plus l'apport thermique augmente, moins il est nécessaire d'accroître la température de fonctionnement. En cas de pointage ou de soudage de réparation, il est particulièrement important d'augmenter la température de fonctionnement car une soudure locale de petite taille refroidit rapidement et durcit tout aussi vite. Par ailleurs, nous vous déconseillons de démarrer ou d'arrêter une passe de soudage dans les angles d'une structure. Le préchauffage présente de nombreux avantages pour le soudage des aciers durcis. Un préchauffage modéré à des températures inférieures à +100 °C améliore l'aptitude au soudage, y compris pour des épaisseurs de plaque qui normalement, selon les instructions fournies, ne demanderaient pas de préchauffage. Pour le soudage de structures complexes et de grande taille, et dans des conditions difficiles, nous vous recommandons d'utiliser une température de fonctionnement supérieure aux valeurs du tableau, mais inférieure à +220 °C. Par contre, n'utilisez jamais de températures de fonctionnement ou entre les passes supérieures aux besoins qui diminueraient la dureté de la soudure.

TABLEAU 8. CONSEILS PRATIQUES POUR ÉLIMINER LES CONTRAINTES RÉSIDUELLES.

Éliminer les contraintes résiduelles dès la phase de planification.
Minimiser les différences de rigidité dans diverses parties de la structure.
Optimiser la taille de la soudure.
Prévoir et contrôler les distorsions.
Utiliser la précontrainte lors du soudage de grandes structures.
Privilégier les petits espacements dans les structures à souder.
Faire bon usage des rainures de pénétration complète sur les deux côtés, lors du soudage de plaques épaisses.
Polir les arêtes et les angles d'une structure en acier soudé.
Finir le soudage d'une structure soumise à la fatigue en polissant les raccords entre soudures et métal de base.

FIGURE 7. TEMPÉRATURES (°C) DE FONCTIONNEMENT RECOMMANDÉES POUR LE SOUDAGE QUAND L'APPORT THERMIQUE EST CHOISI CONFORMÉMENT AUX RECOMMANDATIONS DE LA FIGURE 8.

Nuance d'acier	Épaisseur de la plaque, mm							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Raex 400	+20	+75	+100	+125	+150	+175		
Raex 450	+20	+75	+100	+125	+150	+175		+200
Raex 500	+20	+100	+125	+150	+175		+200	

6 OBTENTION D'UNE COMBINAISON OPTIMALE DE PROPRIÉTÉS DANS LES JOINTS SOUDÉS

Les joints soudés des aciers anti-abrasion doivent présenter de bonnes propriétés de résistance mécanique, de dureté et de résistance à l'usure. Selon leur destination et les conditions d'utilisation, ils doivent aussi avoir une bonne résilience ou présenter d'autres propriétés spécifiques. La dureté est la seule propriété pour laquelle une valeur numérique est fournie. Pour obtenir une qualité optimale dans la zone de soudure, utilisez les paramètres de soudage appropriés et la température de fonctionnement recommandée.

6.1 PARAMÈTRES DE SOUDAGE RECOMMANDÉS

Les paramètres de soudage recommandés sont déterminés à l'aide de la variable $t_{8/5}$. Pour obtenir des propriétés optimales au niveau du joint soudé, l'apport thermique doit correspondre à un temps de refroidissement $t_{8/5} = 10-20$ secondes. Le temps de refroidissement de 10 secondes correspond à la valeur minimale d'apport thermique et le temps de refroidissement de 20 secondes correspond à la valeur maximale d'apport thermique. Une valeur $t_{8/5}$ trop petite (refroidissement rapide) augmente le durcissement de la zone affectée par la chaleur et la sensibilité à la fissuration à froid. Une valeur $t_{8/5}$ trop grande (refroidissement lent) diminue la dureté, la résistance mécanique et la résistance aux chocs du joint.

La figure 8 montre les valeurs minimales et maximales recommandées d'apport thermique pour les aciers Raex. Les températures de fonctionnement indiquées dans la figure 7 ont servi à déterminer les limites d'apport thermique. Il est possible de réduire les valeurs d'apport thermique minimales indiquées dans la figure 8 en augmentant la température de fonctionnement. Cela peut s'avérer nécessaire, par exemple, lors du pointage et du soudage de passes sur l'envers ou de passes de base.

6.2 ZONE TENDRE DANS LES JOINTS SOUDÉS

L'alliage et le durcissement sont des conditions essentielles de la haute limite d'élasticité et de la dureté des aciers anti-abrasion. Dans un soudage par fusion, la température du joint atteint au minimum +1500 °C. Lors du soudage d'aciers anti-abrasion, des zones tendres se forment dans le joint. La zone affectée par la chaleur subit toujours un ramollissement. Par ailleurs, le métal soudé reste

généralement plus tendre que le métal de base dur. La figure 9 montre le profil de dureté type des joints soudés dans les aciers Raex.

Remarques sur le profil de dureté :

- La dureté de la zone affectée par la chaleur dans les joints soudés des aciers Raex est en général inférieure à celle du métal de base.
- Le profil de dureté de l'acier Raex découpé à chaud à partir de l'arête vers le métal de base est identique à celui de la zone affectée par la chaleur, à deux exceptions près : la dureté maximale de l'arête est légèrement supérieure et la zone tendre de la plaque découpée est plus étroite que dans un joint soudé.
- La dureté de la zone affectée par la chaleur dans un acier S355 ordinaire est en général supérieure à la dureté du métal de base ; il en va de même des arêtes découpées à chaud.

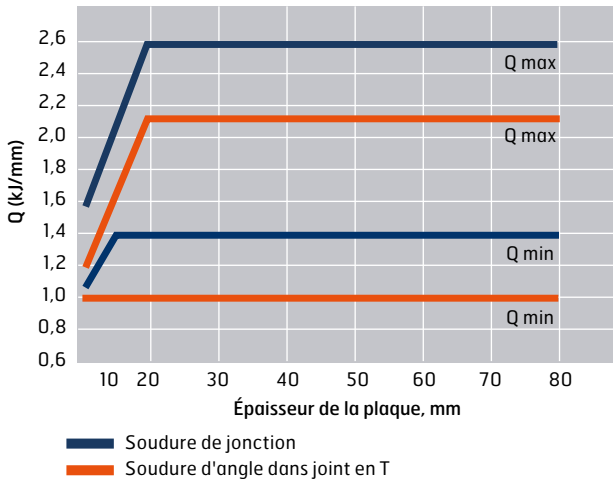
Profil de dureté des joints soudés dans les aciers Raex :

- La dureté du métal soudé dépend de l'apport thermique et de l'alliage des consommables de soudage.
- Dans la zone affectée par la chaleur, près de la ligne de fusion, la dureté est égale à celle du métal de base.
- Le ramollissement de la zone affectée par la chaleur est accentué quand l'apport thermique est accru, c'est-à-dire quand le temps de refroidissement ($t_{8/5}$) s'allonge.

Il convient de prendre en compte la tendance au ramollissement provoquée par le soudage, en particulier lors du travail de nuances plus dures et de petites épaisseurs. Pour éviter le ramollissement, il est préférable de souder les plaques fines à une température ambiante de +20 °C et d'éviter le préchauffage. La limitation de l'apport thermique et le respect de la température maximale de fonctionnement/entre les passes évitent le ramollissement.

La présence d'une zone tendre n'écourte généralement pas la durée de vie utile des équipements ou des structures intégrant de l'acier anti-abrasion. Toutefois, lorsque la conception exige une résistance de l'ensemble de la structure, vous devez tenir compte de cette zone tendre. Dans ce type de structure, les joints soudés doivent être placés hors des zones soumises aux contraintes les plus fortes.

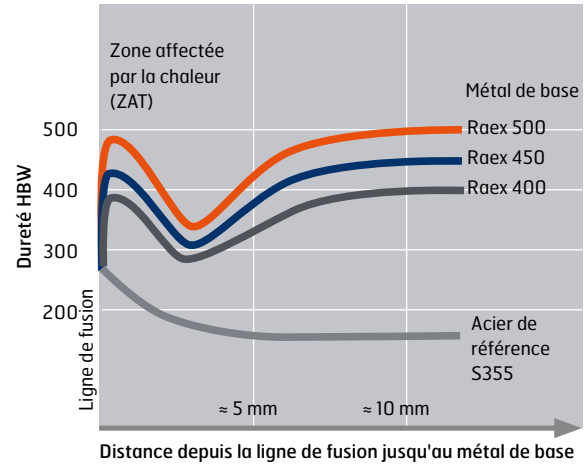
FIGURE 8. RAEX 400, RAEX 450 ET RAEX 500. RECOMMANDATION CONCERNANT L'APPORT THERMIQUE (Q), SOUDAGE À L'ARC.



$$Q = \frac{k \times 60 \times U \times I}{1000 \times v}$$

Q = Apport thermique (kJ/mm)
 k = Efficacité thermique
 k = 0,8 pour MAG, FCAW et MMA
 k = 1 pour SAW
 U = Tension (V), I = Courant (A)
 v = Vitesse de soudage (mm/min)

FIGURE 9. PROFIL DE DURETÉ TYPE DE LA ZONE AFFECTÉE PAR LA CHALEUR D'UN JOINT SOUDÉ LORSQUE LES TEMPS DE REFROIDISSEMENT T_{8/5} RECOMMANDÉS SONT UTILISÉS.



Comparaison avec le profil de dureté correspondant d'un acier de construction S355 standard.

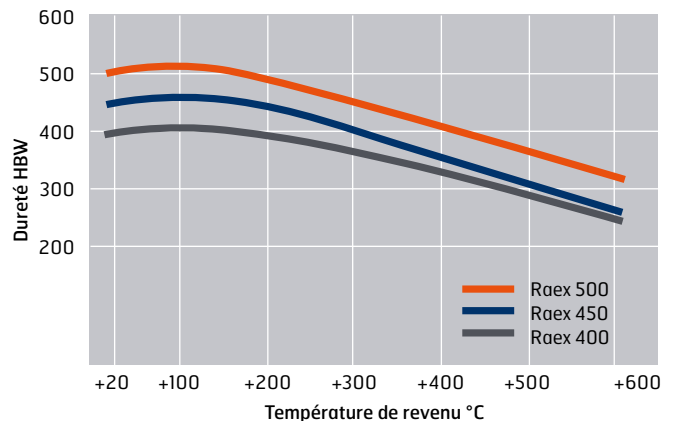
7 TRAITEMENT THERMIQUE

Les aciers anti-abrasion ne sont pas conçus pour subir un traitement thermique. Le traitement thermique à des températures élevées diminue leur dureté, leur limite d'élasticité et leurs propriétés de résistance à l'usure. La figure 10 illustre la modification de la dureté des aciers Raex après revenu à diverses températures. Comme indiqué dans la figure, la dureté générée par la trempe diminue en partie lors de l'opération de revenu.

Le traitement thermique à une température supérieure à +250 °C réduit la dureté. Il n'est donc pas possible d'éliminer les contraintes des aciers Raex sans réduire leur dureté. Le traitement thermique après soudure n'est pas recommandé.

Après soudage ou autres opérations d'usinage, l'acier durci est parfois revenu ou libéré des contraintes en fonction de l'application souhaitée. Les propriétés mécaniques engendrées par ce type de traitement thermique sont alors acceptées. Il arrive en effet qu'il soit justifié, car le revenu peut améliorer la résistance d'un acier durci. L'élimination des contraintes, quant à elle, peut permettre de réduire les contraintes créées dans la plaque d'acier au moment de la fabrication.

FIGURE 10. EFFET DE LA TEMPÉRATURE DU REVENU SUR LA DURETÉ.



Les valeurs de dureté ont été mesurées à température ambiante après revenu à températures élevées. Après un temps de maintien à température de deux heures, les aciers ont refroidi à l'air, à température ambiante.

8 COMPORTEMENTS DE L'ACIER LORS D'UNE DÉCOUPE THERMIQUE

La découpe thermique est généralement utilisée pour les plaques épaisses et les grands objets. Cette méthode applique un traitement thermique local à la surface de l'acier jusqu'à une profondeur de quelques millimètres à partir de l'arête et modifie la microstructure. Ce traitement provoque la formation d'une couche dure et d'une couche tendre sur l'arête.

8.1 PROCÉDURE DE DÉCOUPE THERMIQUE

La surface de l'acier découpé thermiquement est chauffée pendant un court moment, quasiment au point de fusion de l'acier. Après la découpe, la pièce coupée refroidit rapidement, sauf si vous faites en sorte de contrôler la vitesse du refroidissement. Lors de la découpe thermique, la surface de l'acier subit des changements microstructuraux identiques à ceux de la zone affectée par la chaleur. La surface extérieure de la pièce découpée durcit. La surface durcie est sensible à la fissuration à froid. Sous la surface durcie, une zone tendre s'est formée (figure 11). La zone tendre a subi un recuit. La largeur des deux zones dépend de la méthode et des paramètres de découpe.

8.2 CONTRÔLE DE LA DURETÉ DE LA SURFACE AVEC LA TEMPÉRATURE DE FONCTIONNEMENT

Lors de la découpe thermique, nous vous recommandons de contrôler la dureté de la surface traitée thermiquement de manière à garder la surface intacte. Une dureté maximale suffisamment basse évite la formation de fissures sur l'arête. Il est courant d'utiliser le préchauffage pour contrôler le durcissement. Les températures de fonctionnement recommandées pour la découpe thermique sont indiquées dans la figure 12.

Pour que le préchauffage ne dépasse pas la température ambiante, vous devez régler la vitesse de découpe à un niveau suffisamment bas et choisir vos buses de découpe et autres matériels en fonction. Pour savoir quelle méthode de découpe convient le mieux à vos besoins, contactez notre service technique ou le fabricant du matériel de découpe.

8.3 PRÉVENTION DU RAMOLLISSEMENT LORS D'UNE DÉCOUPE THERMIQUE

L'énergie de découpe des grandes sections d'acier est répartie dans la plaque environnante, accélérant le refroidissement de la zone de découpe et limitant la largeur de la zone tendre. Toutefois, lors de l'oxycoupage de plaques d'une épaisseur maximale de 30 mm, la distance

entre les lignes de coupe doit être inférieure à 200 mm pour éviter le ramollissement de la plaque entière. L'ordre de découpe permet aussi de contrôler le ramollissement.

Plus la taille de la section et l'épaisseur de la plaque sont réduites, plus le ramollissement s'intensifie. Lorsque vous découpez de petites sections, l'énergie thermique générée par la découpe et par le préchauffage éventuel s'accumule dans la section de coupe, ralentissant le processus de refroidissement. La découpe laser et la découpe plasma sont les deux méthodes de découpe thermique qui permettent d'obtenir un ramollissement moindre avec des épaisseurs de plaque adéquates. La zone tendre de l'acier découpé au laser ou au plasma est plus étroite que celle de l'acier oxycoupé (figure 13). La découpe plasma immergé et l'oxycoupage permettent de contrôler efficacement le ramollissement de la section coupée et autorisent donc la découpe de sections de toutes tailles. Pour contrôler le ramollissement, nous vous recommandons d'utiliser des méthodes de découpe à froid, par exemple la découpe au jet d'eau non thermique ou la découpe au jet d'eau abrasive.

8.4 CONSEILS PRATIQUES POUR LA DÉCOUPE THERMIQUE

Les températures négatives ont une influence sur les propriétés de mise en œuvre des plaques, et vous devez en tenir compte. Si vos plaques sont stockées dans un endroit froid, ramenez-les à l'atelier, suffisamment longtemps avant l'oxycoupage et le soudage. La figure 13 illustre en combien de temps une plaque d'acier stockée à une température inférieure à zéro est mise à température une fois ramenée en atelier. Les mesures ont été réalisées en février, dans le nord de la Finlande, avec des plaques de trois épaisseurs différentes.

La figure 13 illustre les résultats des tests de mise en température, en passant de -20 °C à +17 °C :

- environ 8 heures pour une plaque de 12 mm ;
- environ 12 heures pour une plaque de 21 mm ;
- environ 17 heures pour une plaque de 40 mm.

La surface et le centre de la plaque reviennent à température à une vitesse équivalente. L'empilement des plaques les plus larges et les plus épaisses ralentit la mise à température. En règle générale, une plaque froide (largeur 2 m, longueur 6 m) stockée à l'extérieur à une température inférieure à zéro est mise à température ambiante en 24 heures environ.

Conseils pratiques :

- Avant la découpe, les plaques froides doivent être entreposées à température ambiante (+20 °C) pour être mises à température.
- Les plaques stockées au froid doivent être ramenées en atelier la veille de la découpe.
- Les plaques froides doivent être entreposées sur des supports en bois.
- Une plaque froide de 40 mm (-20 °C) est mise à température ambiante (+20 °C) en 24 heures environ.
- Lorsque vous découpez des plaques épaisses, appliquez une température de fonctionnement élevée, conformément à la figure 12.
- Ensuite, après la découpe thermique, meulez pour éliminer les arêtes et copeaux sur la surface durcie.

FIGURE 11. PLAQUE D'ACIER ANTI-ABRASION, 6 mm. PROFIL DE DURETÉ TYPE D'UNE SURFACE DÉCOUPEE THERMIQUEMENT, DU BORD VERS L'ACIER DE BASE.

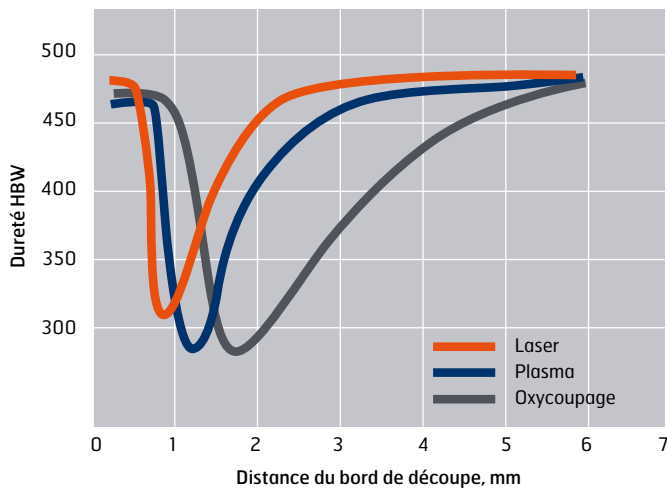
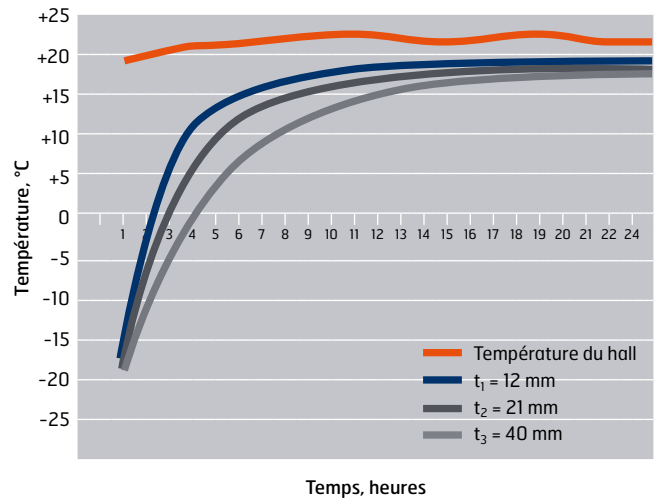


FIGURE 13. TEMPS DE MISE À TEMPÉRATURE DES PLAQUES D'ACIER FROIDES (-20 °C) DANS UN ATELIER OÙ LA TEMPÉRATURE EST COMPRISE ENTRE +20 °C ET +22 °C.



Taille des plaques : 12 x 1000 x 2000, 21 x 1000 x 1600 et 40 x 1000 x 2000 mm.

FIGURE 12. TEMPÉRATURES DE FONCTIONNEMENT RECOMMANDÉES (°C) POUR L'OXYCOUPAGE.

Nuance d'acier	Épaisseur de la plaque, mm							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Raex 400	+20	+75	+100	+125	+150	+175		
Raex 450	+20	+75	+100	+125	+150	+175		
Raex 500	+20	+100	+125	+150	+175			

CONTACT