

# NOUVELLE GÉNÉRATION D'ACIERS À 12% CR: VM12

## SOUDABILITÉ ET PROPRIÉTÉS À HAUTE TEMPÉRATURE

Actuellement, les aciers martensitiques 9% Cr, comme le E911 et P92, sont utilisés dans des centrales thermiques avec des paramètres de vapeur avancés. Le programme de recherche européen COST 522 avait pour objectif de développer de nouveaux matériaux qui permettaient une température de vapeur plus élevée (jusque 650 °C), ce qui augmente l'efficacité de la centrale et est par conséquent favorable pour l'environnement. Afin de répondre à cette question, Vallourec-Mannesmann a développé un nouvel acier martensitique 12% Cr, appelé VM12, produit en tube et en tuyau avec une résistance au fluage comparable au E911, T/P92 et une meilleure résistance à la corrosion que le X20CrMoV12-1.



Par Ing. J. Vekeman  
(Traduction: M.C. Ritzen - IBS-BIL)

### Objectif

L'objectif de ce projet était d'examiner la soudabilité de ce nouvel acier 12%Cr et le comportement des soudures à haute température. Les résultats de ce projet ont également été présentés dans le nouveau programme de recherche européen COST 536: "Alloy development for critical components of environmental friendly power plant" (ACCEPT). Dans le cadre de ce projet, des tubes à paroi mince, épaisseur de 8,8 mm et diamètre extérieur de 60,3 mm ainsi que des tuyaux à paroi épaisse, épaisseur de 35 mm et diamètre extérieur de

Tableau 1: Composition chimique du VM12 (Heat 53.058) suivant certificat Vallourec & Mannesmann

C	0,12
Si	0,49
Mn	0,35
P	0,018
S	0,001
Cr	11,5
Mo	0,29
Ni	0,29
Al	0,008
Nb	0,05
V	0,26
N	0,067
Co	1,62
B	0,005
W	1,5

406,4 mm ont été examinés. Les tubes et les tuyaux provenaient du même 'heat' 53.058 et avaient une structure martensitique normalisée et recuite, avec une faible quantité de ferrite delta dans les tuyaux. La composition chimique est reprise dans le tableau 1.

### Étude de la soudabilité - Simulations de soudage

Des essais de simulation de soudage ont été réalisés comme étude préliminaire sur la soudure même. L'influence des paramètres de soudage et d'un traitement thermique après soudage (PWHT) sur la dureté, la ductilité et la microstructure de la zone affectée thermiquement (ZAT) a été examinée en reproduisant les cycles thermiques apparaissant durant le soudage dans des éprouvettes (de résilience - sans entaille) en acier de base. Les tubes et tuyaux présentent un comportement similaire après simulation de soudage et recuit de relaxation à 770 °C en ce qui concerne la dureté et la ductilité. Dans la zone affectée thermiquement à gros grains, on trouve la dureté la plus élevée et la ductilité la plus faible. La dureté reste toujours inférieure à la valeur exigée 350 HV10 (pour les applications dans les centrales thermiques) et varie peu avec des vitesses de refroidissement variables. Afin d'avoir une résilience suffisante dans la zone affectée thermiquement à gros grains, 27 J minimum suivant la Pressure Equipment Directive (PED), il faut

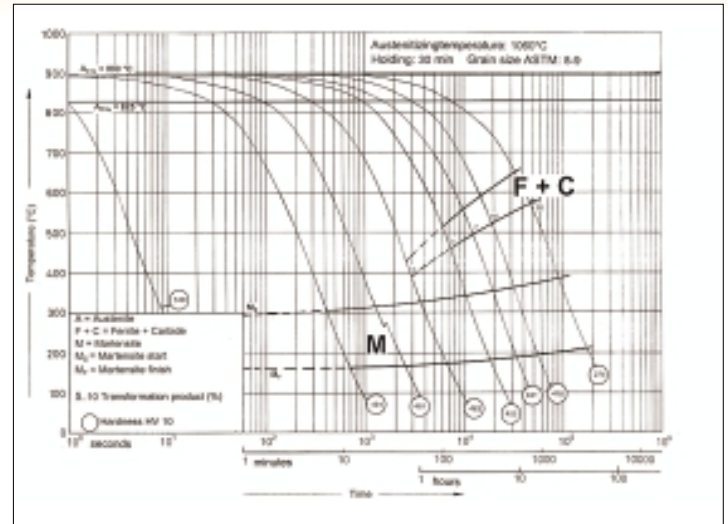


Figure 1: Diagramme CCT-VM12 (Heat 53.058) - Ref. Vallourec & Mannesmann

souder avec un apport calorifique approprié (correspondant à des temps de refroidissement inférieurs à 60 secondes) afin de limiter la croissance des grains. D'autre part, on obtenait plus de ferrite delta quand un apport calorifique faible (temps de refroidissement moindres) était simulé. La ferrite delta était plus facilement formée dans les éprouvettes de tuyaux. Le soudage en plusieurs couches a également été simulé en appliquant un deuxième cycle de soudage après un premier cycle de soudage avec  $Tp1=1.350\text{ °C}$ . L'application d'un deuxième cycle de soudage avec  $Tp2=1.000\text{ °C}$  donne un affinement du grain, moins de ferrite delta et une meilleure ductilité dans la zone affectée thermiquement à gros grains. Mais  $Tp2=850\text{ °C}$  a une influence négative (pas d'affinement du grain). Les résiliences diminuent et on a localement plus de ferrite delta dans la zone intercritique réchauffée, affectée thermiquement à gros grains.

### Sensibilité à la fissuration au réchauffage

La fissuration au réchauffage (reheat cracking) est une cause possible d'échec du soudage dans les aciers ferritiques durcissables par précipitation, résistants au fluage. C'est un phénomène de fissuration intergranulaire qui apparaît souvent dans la zone affectée thermiquement à gros grains durant un traitement thermique après soudage ou en service à haute température.

Au sein de l'IBS, on a développé une méthode d'essai où les essais de traction isothermes sont réalisés sur des éprouvettes de traction de simulation de soudage. Des éprouvettes cylindriques sont soumises à un cycle thermique de soudage ( $Tp1 = 1.350\text{ °C}$ ,  $t8/5 = 30\text{ s}$ ), de telle sorte qu'une ZAT à gros grains est simulée. Après simulation, l'éprouvette est soumise à un essai de traction à des températures allant de 650 à 800 °C. Après rupture de l'éprouvette, la striction est mesurée. Une striction inférieure à 20% est déjà une indication que le matériau est sensible à la fissuration au réchauffage. Les éprouvettes de simulation de soudage prélevées sur les tubes et tuyaux VM12 avaient une ductilité élevée sur toute la plage des températures (strictions supérieures à 20%). VM12 n'est donc pas sensible à la fissuration au réchauffage.

### Soudage

VM12 est un acier martensitique durcissable à l'air, normalisé et recuit. Lors du refroidissement du domaine austénitique à température ambiante, la structure du VM12 est soumise à une transformation complète en martensite avec une dureté maximale de 510 HV10 comme on peut le voir dans le diagramme CCT dans la figure 1. Ceci signifie que le métal d'apport matching et la zone affectée thermiquement ont une structure dure et fragile quand on ne prend aucune

mesure de précaution spéciale. En cas de stockage, on peut avoir une semaine maximale entre le soudage et le traitement thermique après soudage. Durant cette période, les éléments soudés doivent être maintenus au sec, comme le T/P91 et le P92, afin d'éviter les fissures par corrosion sous tension. Un préchauffage et un traitement après soudage sont nécessaires afin d'avoir une ductilité suffisante et éviter des fissures à froid. Le VM12 a été soudé avec les procédés de soudage suivants: soudage TIG (Gas Tungsten Arc Welding ou GTAW), soudage manuel avec électrodes (Shielded Metal Arc Welding ou SMAW) et soudage à l'arc submergé (Submerged Arc Welding ou SAW) à des matériaux aussi bien homogènes qu'hétérogènes (T/P91). Les tubes et tuyaux ont été soudés avec des métaux d'apport matching, Thermanit MTS 5CoT de Böhrer-Thyssen Welding (Allemagne). Lors du soudage martensitique, on a choisi une température de préchauffage et d'interpasses inférieure à la température de départ de la martensite Ms (autour de 300 °C). Ceci a pour conséquence que durant le refroidissement d'un cordon de soudage, une partie du métal fondu est transformée en martensite. Durant le soudage des couches suivantes, une partie de la martensite déjà formée subit un revenu. Les tubes ont été préchauffés à 200 °C, les tuyaux à 200-250 °C. Après soudage, les éléments ont été refroidis jusqu'à la température ambiante et soumis à un traitement thermique après soudage à 770 °C durant 2 heures pour les tubes et durant 4 heures pour les tuyaux. Les soudures circulaires des éléments VM12 ont été testées suivant l'EN ISO 15614-1. Les soudures homogènes VM12-VM12 et soudures hétérogènes VM12-T/P91 satisfaisaient toutes aux exigences de résistance à la traction (rupture dans le métal de base), pliage (pas

de fissures supérieures à 3 mm après pliage à 180°) et dureté (inférieure à 350 HV10). Dans les éléments soudés sur chantier, on ne rencontre pas de ferrite delta dans la zone affectée thermiquement, en raison de la résilience élevée. Une faible ductilité a été trouvée dans le métal fondu, avec des valeurs ne répondant pas aux exigences minimales de la PED dans les soudures homogènes TIG et à l'arc submergé. Les micrographies montraient la présence d'îlots de ferrite delta dans le métal fondu des tubes soudés TIG (figure 2) et des tuyaux soudés à l'arc submergé. Plus de ferrite delta a été trouvée dans les couches de remplissage. Dans le tuyau soudé à l'électrode, aucune ferrite delta n'a été trouvée. Néanmoins, une teneur élevée en Ni a été trouvée dans le métal déposé du tuyau soudé à l'électrode, une faible teneur en Ni dans les éléments soudés au TIG et à l'arc submergé. La composition chimique du métal fondu après soudage avec entre autres une faible teneur en Ni et la présence de ferrite delta a une influence négative sur la résilience. Lors du soudage des tubes, la ferrite delta s'est surtout formée dans la dernière couche. Les soudures hétérogènes à T/P91 présentaient de bonnes résiliences dans le métal fondu (suite à la dilution avec l'acier 9%Cr).

### Essai de fluage

Des essais de fluage uniaxiaux sur le métal de base et les soudures sur tuyaux (SMAW et SAW) ont été réalisés par Laborelec. Les éprouvettes ont été prélevées transversalement à la soudure. Toutes les éprouvettes, avec un diamètre de 5 mm, ont été chauffées jusqu'à la température d'essai souhaitée entre 650 et 720 °C et soumises à une charge constante qui correspond à une tension initiale de 78 MPa. Le temps pour arriver à la rupture a été enregistré et l'endroit de la rupture a été déterminé après examen

métallographique. Les essais à 650 °C ont été comparés avec les données de fluage de Vallourec & Mannesmann et les spécifications pour E911 suivant les données ECCC dans le diagramme isotherme de la figure 3. La résistance au fluage du VM12 à 650 °C - 78 MPa se situe près de la résistance moyenne au fluage pour E911, mais il y a une chute de résistance au fluage du métal de base VM12 pour des tensions plus faibles et des essais plus longs. Dans ces conditions, la résistance au fluage de VM12 se situe sous la résistance moyenne au fluage pour E911 et P92 (données ECCC 2005). L'extrapolation des résultats au fluage isobares de Laborelec vers des températures plus faibles a confirmé les résultats au fluage isothermes de Vallourec & Mannesmann. Une recherche se fait actuellement au niveau mondial sur la stabilité de la microstructure des aciers à 9 à 12% Cr. Un grand nombre d'alliages d'essai qui contiennent 11 à 12% Cr et ont été développés pour des applications à 650 °C, présentent une chute en résistance au fluage entre 5.000 et 10.000 heures à 650 °C. L'écroûissage au moyen de précipités MX détermine la résistance au fluage de ces aciers ferritiques/martensitiques. Une recherche récente a montré que ces précipités peuvent être dissous par la phase Z qui précipite durant l'essai de fluage. C'est surtout un problème pour les aciers qui contiennent plus de 10% de Cr et de Nb. La précipitation de la phase Z peut expliquer la chute de la résistance au fluage du VM12. Ceci a fait l'objet d'une recherche dans le cadre du programme COST 536. Une dispersion de 20% des données du VM12 et E911 a été posée comme principe pour l'estimation de la résistance au fluage des soudures. On voit dans la figure 3 que la résistance au fluage des deux soudures à 650 °C - 78 MPa tombe dans la bande de

dispersion du E911. Les éprouvettes se sont cassées dans la petite zone affectée thermiquement, douce, à grains fins près du métal de base (zone affectée thermiquement intercritique ou IC HAZ) comme c'est le cas avec d'autres aciers ferritiques et martensitiques.

### CONCLUSIONS

- La composition chimique du métal déposé et les paramètres de soudage sont déterminants pour la quantité de ferrite delta dans le métal fondu après soudage. La ferrite delta dans le métal fondu entraîne de faibles valeurs de résilience.
- Généralement, on peut dire que les soudures avec moins de couches avec un apport calorifique et une température de préchauffage plus élevées ont de moindres quantités de ferrite delta. D'autre part, l'apport calorifique doit être limité afin de limiter la croissance des grains et éviter de faibles résiliences dans la zone affectée thermiquement à gros grains lors d'un refroidissement de longue durée.
- Le soudage multicouches est nécessaires pour obtenir un affinement du grain et une meilleure résilience et pour limiter la quantité de ferrite delta.
- Il est recommandé de préchauffer entre 200 °C-250 °C, de préférence 250 °C pour les tuyaux, et de souder avec un apport calorifique entre 10 kJ/cm et 18 kJ/cm. La résistance au fluage du métal de base VM12 diminue avec des tensions plus faibles et des essais plus longs. La résistance au fluage du VM12 tombe dans la bande de dispersion du E911 (ECCC Data 2005). □

Les entreprises suivantes ont participé à cette recherche: LABORELEC, VALLOUREC & MANNESMANN, BOHLER-THYSSEN, STORK-MEC, FABRICOM, CMI: COCKERILL MECHANICAL INDUSTRIES, CIP: CARNOY INDUSTRIAL PIPING, AIB-VINCOTTE, WTCM, TRACTEBEL, VCI

Figure 2: Îlots de ferrite delta dans le métal fondu du tube soudé TIG

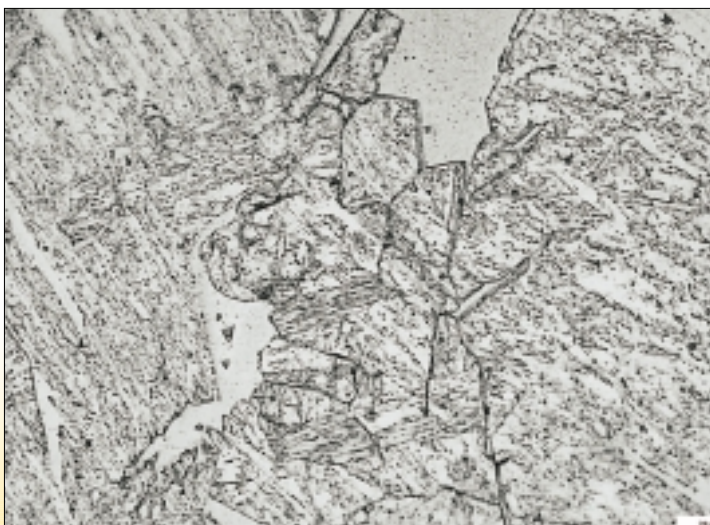


Figure 3: Diagramme de fluage isotherme (650 °C) du métal de base et des soudures VM12

